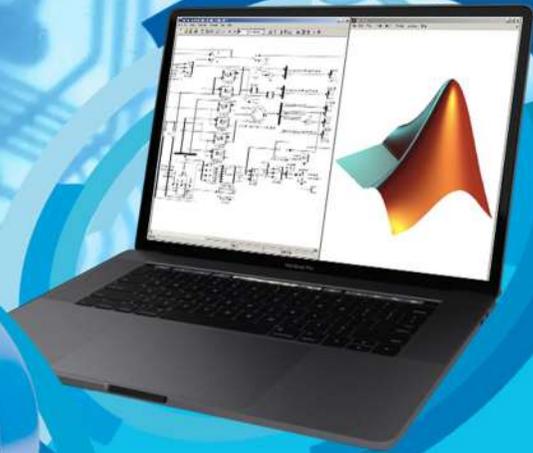


MONOGRAF

PENGEMBANGAN PERANGKAT PEMBELAJARAN SISTEM KENDALI MOTOR LISTRIK BERKINERJA TINGGI



Penulis:

Dr. Muchlas, M.T.

UAID
PRESS

Monograf

**PENGEMBANGAN
PERANGKAT PEMBELAJARAN
SISTEM KENDALI MOTOR LISTRIK
BERKINERJA TINGGI**

Penulis:
Dr. Muchlas, M. T.



**Sanksi Pelanggaran Pasal 113
Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014
Tentang Hak Cipta**

1. Setiap orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk penggunaan secara komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk penggunaan secara komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
3. Setiap orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk penggunaan secara komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
4. Setiap orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp. 4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

Monograf

**PENGEMBANGAN
PERANGKAT PEMBELAJARAN
SISTEM KENDALI MOTOR LISTRIK
BERKINERJA TINGGI**

Penulis:
Dr. Muchlas, M. T.



MONOGRAF
PENGEMBANGAN PERANGKAT PEMBELAJARAN
SISTEM KENDALI MOTOR LISTRIK BERKINERJA TINGGI

Copyright © 2020 Dr. Muchlas, M. T.

ISBN: 978-602-0737-52-2

16x24 cm, xiv + 156 hlm

Cetakan Pertama, Agustus 2020

Penulis: Dr. Muchlas, M. T.

Pra Cetak: Hatib Rahmawan

Layout: Ratih Purwandari

Desain Cover: Hafidz Irfana

Diterbitkan oleh:

UAD Press

Anggota IKAPI dan APPTI

Alamat Penerbit:

Kampus IV Universitas Ahmad Dahlan

Jl. Ringroad Selatan Tamanan Banguntapan Bantul Yogyakarta

E-mail: uadpress@uad.ac.id

HP/WA: 082134455340

All right reserved. Semua hak cipta © dilindungi undang-undang. Tidak diperkenankan memproduksi ulang, atau mengubah dalam bentuk apapun melalui cara elektronik, mekanis, fotocopy, atau rekaman sebagian atau seluruh buku ini tanpa ijin tertulis dari pemilik hak cipta.

PRAKATA

Alhamdulillahirabbil'alamin, atas hidayah dari Allah SWT, buku monograf ini dapat diselesaikan sesuai target yang ditentukan. Laboratorium merupakan fasilitas penting dan sangat dibutuhkan dalam mendukung kegiatan pembelajaran praktik di lingkungan pendidikan tinggi teknik baik program akademik maupun vokasi. Keterbatasan peralatan yang tersedia di laboratorium dan adanya kebutuhan akan perangkat praktik yang fleksibel, efisien dan aman, telah mendorong penulisan monograf ini. Melalui monograf ini dideskripsikan cara melakukan pengembangan sebuah simulator yang dapat digunakan sebagai perangkat pembelajaran praktik sistem kendali motor induksi berkinerja tinggi yang layak, fleksibel, aman dan efisien.

Monograf ini dapat digunakan oleh dosen program studi teknik elektro atau guru Sekolah Menengah Kejuruan (SMK) sebagai referensi dalam mengembangkan perangkat pembelajaran mesin-mesin listrik yang fleksibel, efisien dan aman, khususnya pengendalian motor induksi menggunakan sistem kendali berkinerja tinggi yang dilengkapi dengan unit *soft starter* dan unit *stall detector*. Selain itu, monograf ini dapat digunakan pula sebagai referensi penelitian yang terkait dengan pengembangan perangkat pembelajaran berbasis program aplikasi SIMULINK dari Matlab.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terimakasih atas bantuan yang telah diberikan, kepada: (1) bapak Sunardi, Ph. D. dan bapak Ricky Dwi Puriyanto, S.T., M.Eng. atas kesediannya melakukan evaluasi formatif *alpha test* terhadap produk yang menjadi dasar penyusunan monograf; dan (2) para mahasiswa program studi Teknik Elektro UAD semester akhir yang telah bersedia menjadi *tester* produk pada monograf ini. Semoga Allah Swt memberikan imbalan pahala yang berlipat ganda terhadap bantuan yang telah diberikan.

Disadari sepenuhnya bahwa monograf ini masih belum sempurna, untuk itu saran dari semua pihak sangat dinanti kedatangannya. Akhirnya penulis berharap semoga monograf ini dapat digunakan sebagai bahan acuan dalam usaha-usaha peningkatan kualitas pendidikan teknik di Indonesia khususnya dalam hal pembelajaran praktik di laboratorium.

Yogyakarta, Agustus 2020

Penulis

DAFTAR ISI

| | |
|--|-----|
| Prakata | v |
| Daftar Isi | vii |
| Daftar Tabel | ix |
| Daftar Gambar | xi |
| | |
| BAB I. PENDAHULUAN | 1 |
| A. Latar Belakang Masalah | 1 |
| B. Rumusan Masalah | 5 |
| C. Tujuan dan Manfaat | 6 |
| | |
| BAB II. PENGENDALIAN MOTOR INDUKSI MENGUNAKAN <i>THYRISTOR</i> | 9 |
| A. Prinsip Kerja | 9 |
| B. Pengendali Tegangan Menggunakan <i>Thyristor</i> untuk Beban Motor Tiga Fase | 14 |
| 1. Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Dicu Tegangan Bukan Sinus | 16 |
| 2. Tegangan Eksitasi | 24 |
| 3. Tegangan Terminal | 26 |
| 4. Bentuk Gelombang Tegangan dan Arus Stator | 28 |
| 5. Prosedur Komputasi Bentuk Gelombang Tegangan dan Arus Motor | 37 |
| C. Validitas Analisis Bentuk Gelombang Tegangan dan Arus Motor | 41 |
| | |
| BAB III. SISTEM KENDALI MOTOR INDUKSI BERKINERJA TINGGI | 43 |
| A. Sistem Kendali <i>Soft-Start</i> | 43 |
| B. Sistem Kendali Deteksi <i>Stall</i> | 48 |

| | |
|--|------------|
| BAB IV. SIMULATOR SEBAGAI MEDIA PEMBELAJARAN | 57 |
| A. Definisi Simulator | 57 |
| B. Jenis Simulator | 59 |
| C. Kelayakan Simulator Sebagai Media Pembelajaran | 60 |
| D. Implementasi Perangkat Pembelajaran Sistem Kendali Motor Listrik Berkinerja Tinggi | 63 |
| E. Metode Pengembangan Simulator | 64 |
| | |
| BAB V. HASIL PENGEMBANGAN DAN PEMBAHASAN | 67 |
| A. Analisis | 67 |
| B. Desain | 69 |
| C. Pengembangan | 75 |
| 1. Unit Input | 76 |
| 2. Unit Pengendali | 80 |
| 3. Unit Output | 87 |
| D. Implementasi | 89 |
| E. Evaluasi | 89 |
| F. Uji Coba Produk | 89 |
| 1. Uji Kinerja Sistem Utama Pengendali Tegangan dengan <i>Thyristor</i> | 90 |
| 2. Uji Kinerja <i>Soft-Starter</i> | 92 |
| 3. Uji Kinerja Detektor <i>Stall</i> | 103 |
| 4. <i>Alpha Testing</i> | 107 |
| 5. <i>Beta Testing</i> | 114 |
| 6. Evaluasi Sumatif | 115 |
| | |
| BAB VI. PENUTUP | 119 |
| | |
| Daftar Pustaka | 125 |
| Lampiran | 133 |
| Biodata Penulis | 155 |

DAFTAR TABEL

| | | |
|-----------|--|-----|
| Tabel 1. | Persamaan Tegangan Terminal Fase a Untuk Mode $\gamma < \pi/3$ | 30 |
| Tabel 2. | Persamaan Tegangan Terminal Fase a Untuk Mode $\gamma > \pi/3$ | 31 |
| Tabel 3. | Persamaan Arus Stator Untuk $\gamma < \pi/3$ | 32 |
| Tabel 4. | Persamaan Arus Stator Untuk $\gamma > \pi/3$ | 33 |
| Tabel 5. | Spesifikasi Simulator Berdasarkan Definisi | 59 |
| Tabel 6. | Langkah ADDIE Disesuaikan Untuk Pengembangan Media Pembelajaran Simulator Sistem Kendali Mesin Listrik Berkinerja Tinggi | 66 |
| Tabel 7. | Spesifikasi Simulator Sistem Kendali Motor Induksi Tiga Fase Berkinerja Tinggi | 70 |
| Tabel 8. | Jenis Motor Induksi Sampel Kajian | 77 |
| Tabel 9. | Beban Motor Untuk Operasi Normal dan <i>Overloaded</i> | 79 |
| Tabel 10. | Nilai Parameter <i>Slope</i> dan <i>Threshold</i> Pada Rangkaian Penggeser Pulsa | 83 |
| Tabel 11. | Nilai Parameter <i>Threshold</i> Pada Unit <i>Stall Detector</i> | 86 |
| Tabel 12. | Perbandingan Arus Stator Beban Normal dan Beban Lebih Untuk Sistem Pengendali Setelah Dipasangi <i>Stall Detector</i> | 106 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|------------|---|----|
| Gambar 1. | Pengendali Tegangan 1-Fase dengan <i>Thyristor</i> | 10 |
| Gambar 2. | Bentuk Gelombang Arus dan Tegangan Motor Induksi 1-Fase Dicatu dengan Tegangan Terkendali Thyristor: (a) $\alpha=\theta=49^\circ$, (b) $\alpha=60^\circ$, (c) $\alpha=100^\circ$, dan (d) $\alpha=150^\circ$ | 14 |
| Gambar 3. | Pengendali Tegangan Tiga Fase Menggunakan <i>Thyristor</i> Terpucu dengan Beban Motor Induksi: (a) Urut-urutan Pemicuan, (b) Rangkaian | 15 |
| Gambar 4. | Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Tiga Fase: (a) Rangkaian Asli, (b) Rangkaian dengan Mempertimbangkan GGL Balik atau <i>Back EMF</i> | 17 |
| Gambar 5. | Rangkaian Ekivalen Sederhana dari Gambar 4 | 19 |
| Gambar 6. | Hubungan Antara Rangkaian Asli dan Termodifikasi | 22 |
| Gambar 7. | Diagram Fasor Rangkaian Ekivalen Termodifikasi | 23 |
| Gambar 8. | Rangkaian Ekivalen Sistem Tiga Fase dengan Mempertimbangkan GGL Lawan | 24 |
| Gambar 9. | Diagram Alir Prosedur Komputasi Tegangan dan Arus Motor dengan α Sebagai Variabel Pengendali | 38 |
| Gambar 10. | Simulasi Menggunakan Prosedur pada Gambar 9 Untuk Mode $\gamma < \pi/3$ | 39 |
| Gambar 11. | Simulasi Menggunakan Prosedur pada Gambar 9 Untuk Mode $\gamma > \pi/3$ | 40 |
| Gambar 12. | Perbandingan Hasil Analisis Teoritik dan Eksperimen Bentuk Gelombang Tegangan dan Arus pada Motor Induksi Tiga Fase | 41 |
| Gambar 13. | Pengendali Tegangan Untuk <i>Soft-Starter</i> Versi <i>Eaton Corporation</i> dan <i>Rockwell Automation</i> | 44 |

| | |
|---|----|
| Gambar 14. Diagram Alir Algoritma <i>Soft-Start</i> : (a) Versi <i>Eaton Corporation</i> dan <i>Rockwell Automation</i> , (b) Versi Mohan, dkk. | 45 |
| Gambar 15. Rancangan <i>Soft-starter</i> dari Ryu, Jeon & Shon | 46 |
| Gambar 16. Desain Sistem Kendali <i>Soft-starter</i> dari Jun, Yao & Xia-hui | 47 |
| Gambar 17. Bentuk Gelombang Hasil Penelitian Terdahulu pada Sistem Kendali <i>Soft-start</i> dari Kiri ke Kanan: Karakteristik Arus, Torsi dan Kecepatan Putar dalam Fungsi Waktu | 48 |
| Gambar 18. Diagram Alir Sistem Kendali Deteksi <i>Stall</i> pada Motor Listrik dari <i>Freescale Semiconductor, Inc.</i> | 49 |
| Gambar 19. Prinsip Pendeteksian <i>Stall</i> Menggunakan GGL Lawan | 50 |
| Gambar 20. Metode Deteksi <i>Stall</i> dari Unsworth: (a) Keadaan GGL Lawan, (b) Rancangan <i>Hardware</i> | 51 |
| Gambar 21. Sistem Proteksi Motor Induksi | 53 |
| Gambar 22. Desain <i>Fault Protector</i> dari Singh, dkk. | 54 |
| Gambar 23. Model Konseptual Produk Simulator | 71 |
| Gambar 24. Arsitektur Perangkat Keras Sistem Kendali Motor Berkinerja Tinggi | 73 |
| Gambar 25. Algoritma Pengendalian Sistem Kendali Motor Berkinerja Tinggi | 74 |
| Gambar 26. Rancangan GUI Simulator Sistem Kendali Motor Induksi Berkinerja Tinggi | 75 |
| Gambar 27. Sumber Tegangan AC Tiga-Phase dan Pengaturan Parameternya Untuk Motor 3HP | 76 |
| Gambar 28. Pemilih Jenis Catu (<i>Supply Mode Selector</i>) | 78 |
| Gambar 29. Saklar Pemilih Skenario: (a) <i>Normal Operation</i> , (b) <i>Overloaded Operation</i> | 79 |
| Gambar 30. Pengendali Tegangan Mengandung Piranti Pensaklaran <i>Thyristor</i> dan Rangkaian Pemicuan Versi SIMULINK | 80 |

| | |
|--|----|
| Gambar 31. Parameter Rangkaian Pemicuan (Kiri) dan <i>Thyristor</i> (Kanan) untuk $f=50$ Hz | 81 |
| Gambar 32. Kiri: Rangkaian Penggeser Pulsa, Kanan: Parameter Untuk Blok <i>Ramp1</i> (atas) dan <i>Switch1</i> (bawah) Pada Motor 50 HP | 82 |
| Gambar 33. Unit <i>Stall Detector</i> Terdiri Atas: (a) Pengaktif <i>Relay</i> dan (b) <i>Relay</i> Pemutus | 83 |
| Gambar 34. Parameter Blok <i>Switch7</i> (Atas) dan <i>Switch6</i> (Bawah) | 84 |
| Gambar 35. Parameter <i>Relay</i> Pemutus | 84 |
| Gambar 36. <i>Timer</i> Pemberian Variasi Beban Untuk Motor 215 HP: (a) Rangkaian; (b) Struktur <i>Timer</i> ; dan (c) Parameter untuk <i>Switch4</i> dan <i>Switch5</i> | 86 |
| Gambar 37. Unit Output Terdiri Atas Motor Induksi Tiga Fase dan Sub Unit Display | 87 |
| Gambar 38. Perangkat Pembelajaran Berupa Simulator Sistem Kendali Motor Induksi Tiga Fase Berkinerja Tinggi Berbasis SIMULINK | 88 |
| Gambar 39. Tahap Pengujian Produk <i>On Going</i> | 90 |
| Gambar 40. Tahap Pengujian Produk <i>Alpha Test</i> , <i>Beta Test</i> , dan Sumatif | 90 |
| Gambar 41. Perbandingan Bentuk Gelombang Tegangan Eksitasi dan Arus Pada Sistem Utama Terhadap Hasil Simulasi Hamed & Chalmers (1990) untuk Berbagai Sudut Pemicuan α | 91 |
| Gambar 42. Karakteristik Dinamis Arus Stator Motor 215 HP untuk Berbagai Jenis Catu Daya | 92 |
| Gambar 43. Reduksi Arus <i>Starting</i> Oleh Unit <i>Soft-Starter</i> untuk Beban Normal-1 | 93 |
| Gambar 44. Reduksi Arus <i>Starting</i> Oleh Unit <i>Soft-Starter</i> untuk Beban Normal-2 | 94 |
| Gambar 45. Pengaruh Beban Terhadap Persentase Reduksi Arus <i>Starting</i> untuk Catu <i>Soft-Start</i> Cepat | 95 |

| | |
|--|-----|
| Gambar 46. Pengaruh Beban Terhadap Persentase Reduksi Arus <i>Starting</i> untuk Catu <i>Soft-Start</i> Sedang | 95 |
| Gambar 47. Pengaruh Beban Terhadap Persentase Reduksi Arus <i>Starting</i> untuk Catu <i>Soft-Start</i> Lambat | 96 |
| Gambar 48. Karakteristik Dinamis Torsi Elektromagnetik Motor 215 HP untuk Berbagai Jenis Catu Daya | 97 |
| Gambar 49. Reduksi Lonjakan Torsi <i>Starting</i> Oleh Unit <i>Soft-Starter</i> untuk Beban Normal-1 | 98 |
| Gambar 50. Reduksi Lonjakan Torsi <i>Starting</i> Oleh Unit <i>Soft-Starter</i> untuk Beban Normal-2 | 98 |
| Gambar 51. Pengaruh Beban Terhadap Persentase Reduksi Torsi <i>Starting</i> untuk Catu <i>Soft-Start</i> Cepat | 99 |
| Gambar 52. Pengaruh Beban Terhadap Persentase Reduksi Torsi <i>Starting</i> untuk Catu <i>Soft-Start</i> Sedang | 100 |
| Gambar 53. Pengaruh Beban Terhadap Persentase Reduksi Torsi <i>Starting</i> untuk Catu <i>Soft-Start</i> Lambat | 100 |
| Gambar 54. Karakteristik Dinamis Kecepatan Rotor Motor 215 HP untuk Berbagai Jenis Catu Daya | 101 |
| Gambar 55. Kecepatan Putar Rotor Pada Berbagai Mode Catu Daya | 102 |
| Gambar 56. Analisis Perbandingan Karakteristik Motor untuk Sistem Kendali <i>Soft-Start</i> Sebelum dan Sesudah Dipasang <i>Stall Detector</i> | 104 |
| Gambar 57. Kelayakan Produk Oleh Ahli Instruksional/ Materi/ Media untuk Aspek Instruksional | 109 |
| Gambar 58. Hasil Evaluasi Produk Oleh Ahli untuk Aspek Tampilan Produk | 111 |
| Gambar 59. Hasil Evaluasi Produk Oleh Ahli untuk Aspek Isi | 113 |
| Gambar 60. Respons Calon Pengguna Produk | 116 |

I | PENDAHULUAN

A. Latar Belakang Masalah

Perkembangan teknologi yang sangat pesat di berbagai bidang saat ini, telah menyebabkan meningkatnya tuntutan dunia usaha dan dunia industri terhadap kompetensi para calon pekerjaannya dalam spektrum yang semakin luas. Lulusan pendidikan tinggi teknik tidak hanya dituntut memiliki kualifikasi akademik yang sesuai, namun juga harus menguasai berbagai keterampilan teknis yang diperlukan dalam dunia pekerjaan. Salah satu keterampilan yang sangat penting dalam mendukung kesiapan kerja para lulusan adalah *employability skills* yang meliputi tujuh aspek yakni keterampilan: (1) dasar; (2) berpikir; (3) mengelola sumber-sumber penting; (4) interpersonal; (5) mengelola informasi; (6) sistem dan teknologi; serta (7) kualitas personal (MD-Nasir, Ali, Noordin & Nordin, 2011: 7). Sejalan dengan pandangan pentingnya keterampilan teknis dalam memasuki dunia kerja, Thompson (2016) dalam *Business Insider* secara dramatis meramalkan sampai tahun 2020 lapangan pekerjaan di berbagai sektor akan membutuhkan sekurang-kurangnya 10 keterampilan mencakup *skills* dalam: (1) fleksibilitas kognitif (berpikir multi konsep secara simultan); (2) negosiasi; (3) melayani; (4) berpendapat dan pengambilan keputusan; (5) *emotional intelligence*; (6) bekerja dengan kelompok; (7) manajemen personal; (8) kreativitas; (9) berpikir kritis; dan (10) menyelesaikan masalah kompleks. Keadaan tersebut menuntut pendidikan tinggi teknik mampu menyiapkan berbagai perangkat pendidikan yang diperlukan agar dapat memenuhi tuntutan dunia pekerjaan yang semakin kompleks.

Memperhatikan pentingnya keterampilan teknis sebagai bekal memasuki dunia kerja, pendidikan tinggi teknik selama ini telah

melaksanakan berbagai upaya melalui pembelajaran di kelas maupun kerja di laboratorium sebagai wahana persemaian keterampilan tersebut. Kegiatan yang dipandang cukup efektif sebagai sarana internalisasi keterampilan teknis adalah praktik di laboratorium. Melalui kegiatan ini, para mahasiswa dapat memperoleh pelatihan keterampilan teknis sesuai dengan tujuan penyelenggaraan praktik yakni: (1) meningkatkan keterampilan teknis yang relevan dengan materi kuliah, (2) meningkatkan pengetahuan dan keterampilan tentang metode penelitian ilmiah, (3) menguatkan teori dengan kegiatan praktik, (4) mengembangkan keterampilan pemecahan masalah, dan (5) membangun serta memelihara sikap profesional (Brown, Bull, & Pendlebury, 1997: 98). Pandangan tentang kegiatan laboratorium sebagai sarana efektif untuk melatih keterampilan teknis juga dikemukakan oleh Ma & Nickerson (2006: 8) yang menyatakan bahwa tujuan pendidikan dari diselenggarakannya kegiatan praktik mencakup: (1) memberikan pemahaman konseptual, (2) melatih keterampilan disain, (3) melatih keterampilan sosial, dan (4) melatih keterampilan profesional. Pendapat tersebut didukung oleh Krivickas & Krivickas (2006: 192) yang menyatakan bahwa fungsi kegiatan laboratorium adalah sebagai tempat untuk melatih keterampilan teknis dengan 13 tujuan yakni melatih keterampilan instrumentasi, pemodelan, eksperimen, analisis data, desain, belajar dari kegagalan, kreativitas, psikomotor, keamanan, komunikasi, kerja tim, etika profesi, dan kepedulian terhadap lingkungan.

Bagi kalangan pendidikan tinggi teknik, kegiatan laboratorium mestinya menjadi prioritas utama dalam pengadaannya selain pengadaan fasilitas-fasilitas kegiatan pembelajaran di kelas. Berbagai upaya perlu dilakukan agar kampus dapat menyediakan fasilitas laboratorium yang memadai. Namun, kenyataan menunjukkan bahwa upaya penyediaan laboratorium khususnya untuk kegiatan yang bersifat *hands-on* banyak mengalami kendala terutama dalam segi pembiayaan. Selain itu, penyelenggaraan praktik menggunakan laboratorium *hands-on* saja akan menghadapi persoalan fleksibilitas ruang dan waktu, karena dosen, instruktur lab dan mahasiswa harus hadir di

laboratorium pada waktu yang telah ditentukan untuk melaksanakan praktik. Khusus untuk praktik Mesin-mesin Listrik dan Sistem Proteksi di lingkungan program studi Teknik Elektro jika mengandalkan peralatan-peralatan yang hanya bersifat *real* memang memerlukan alokasi ruang dan biaya yang besar. Memperhatikan situasi seperti ini, perlu dilakukan upaya-upaya untuk merancang laboratorium yang bersifat maya atau *virtual laboratory* berbasis simulator.

Beberapa kajian para peneliti simulator telah membuktikan bahwa: (1) praktik menggunakan simulasi dapat meningkatkan pemahaman siswa (Colace, Santo, & Pietrosanto, 2004: 22-24); (2) efektivitas hasil belajar yang sama diberikan oleh praktik dengan simulasi dan *hands-on* (Lang, *et al.*, 2004: 1-12; Kantzavelou, 2005: 263-274; Tzafestas, Palaiologou & Alifragis 2006: 360-369; Corter, *et al.*, 2007: 1-27; Wolf, 2010: 216-222); (3) kegiatan simulasi lebih efisien dibandingkan kegiatan di laboratorium real (Candelas, *et al.*, 2006:1-6; Saleh, Mohamed, & Madkour, 2009: 9-17); dan (4) praktik dengan simulasi lebih mudah dan fleksibel (Mateev, Todorova, & Smrikarov, 2007: IV.11.1-6; Bailey & Freeman, 2010: 13-25). Kajian terbaru pada tahun-tahun terakhir ini juga menunjukkan bahwa pembelajaran praktik *online* menggunakan simulator untuk mata kuliah Teknik Digital telah dapat memberikan fleksibilitas ruang dan waktu, efisiensi pembiayaan yang tinggi serta peningkatan hasil belajar pada mahasiswa program studi Teknik Elektro (Muchlas, 2015). Pada bidang Mesin-mesin Listrik, penerapan simulator berbasis Matlab dapat memberikan ketuntasan belajar yang baik (84%) pada pembelajaran praktik tentang karakteristik motor induksi tiga fase (Muchlas, 2016: 53); dan dapat membangkitkan motivasi dan minat belajar, meningkatkan pengetahuan, memberikan kenyamanan serta lebih mudah penggunaannya dibanding alat-alat di laboratorium real (Muchlas, 2018: 67).

Pengendalian motor induksi tiga fase menjadi salah satu kajian yang menarik di lingkungan pendidikan tinggi teknik untuk tujuan peningkatan kinerja mesin. Hal itu disebabkan motor induksi memiliki kelebihan-kelebihan yang tidak dimiliki oleh motor jenis lain seperti motor DC,

sehingga banyak digunakan dalam bidang industri. Untuk daya yang sama, mesin ini harganya lebih murah, konstruksinya lebih kuat dan pemeliharaannya lebih mudah. Namun pada sisi lain, motor jenis induksi ini memiliki kelemahan fundamental yakni pada saat *start-up* membangkitkan lonjakan arus dan torsi yang dapat menimbulkan efek kedip mengganggu alat-alat listrik yang dipasang pada *power line* yang sama, dan dapat menimbulkan kerusakan pada belitan motor. Kajian-kajian tentang pengendalian motor ini sebagian besar dilakukan untuk meningkatkan kinerja motor agar dapat mereduksi timbulnya lonjakan arus dan torsi saat *start-up* sehingga dengan harga yang lebih murah dapat diperoleh mesin yang lebih kuat dengan performansi yang tinggi. Selain dilengkapi dengan *soft-starter* untuk mereduksi lonjakan arus dan torsi pada saat transien, kinerja motor induksi juga dapat ditingkatkan lagi dengan melengkapi sistem kendalinya dengan unit *stall detection* yang akan mematikan secara otomatis catu tegangan motor, jika terjadi *stall* pada keadaan *steady-state*. *Stall* adalah keadaan yang menunjukkan motor memperoleh torsi beban melebihi torsi maksimum yang dapat dibangkitkan sehingga rotor akan berhenti berputar sementara catu tegangan masih terpasang. Keadaan ini dapat menimbulkan kerusakan pada motor jika catu tegangan tidak segera dimatikan.

Cara kerja sistem kendali yang di dalamnya terdapat unit *soft-starter* dan *stall detector* ini perlu menjadi bagian dari materi yang dipelajari oleh mahasiswa agar mereka dapat memiliki pengetahuan dan keterampilan yang baik terhadap prinsip-prinsip pengendalian motor berkinerja tinggi. Melalui cara ini, diharapkan nantinya setelah lulus, mereka dapat mudah beradaptasi dalam menangani pekerjaan yang berhubungan dengan mesin-mesin listrik cerdas (*smart controller*) atau berkinerja tinggi yang saat ini banyak digunakan di lingkungan industri. Untuk memberikan pengetahuan dan keterampilan tentang cara-cara pengendalian motor berkinerja tinggi diperlukan sebuah perangkat pembelajaran yang murah dan mudah dikembangkan. Jika pendekatan simulasi yang dipilih,

penggunaan SIMULINK dapat menjadi alternatif basis pengembangan perangkat pembelajaran sistem kendali berkinerja tinggi ini.

Saat ini memang telah banyak dikembangkan perangkat simulasi pengendalian untuk memperbaiki kinerja motor induksi seperti pernah dilakukan oleh Nithin, Jos & Rafeek (2013: 462-470), Zhang, et. al. (2013: 686-690), Rafeek, *et al.* (2013: 210-213), Raphael & PR (2013: 258-262), Padmapriyadharishini (2015: 66-76), dan Padmapriyadharishini, N & Ramakrishnan (2016: 273-289), namun simulasi-simulasi tersebut masih terbatas pada pengendalian untuk *soft-start* di daerah transien, sedangkan pengendalian *stall detection* belum banyak dikembangkan, terlebih lagi sistem yang mengintegrasikan keduanya dalam sistem kendali motor berkinerja tinggi belum banyak diproduksi. Selain itu, antarmuka dari produk-produk yang telah dikembangkan tersebut nampak kurang *user friendly* sehingga jika digunakan sebagai perangkat pembelajaran akan menyulitkan mahasiswa dalam menggunakannya.

B. Rumusan Masalah

Merujuk pada latar belakang masalah di muka, dapat dirumuskan beberapa masalah terkait dengan pengembangan perangkat pembelajaran sistem kendali motor induksi berkinerja tinggi, sebagai berikut.

1. Sejauh mana ketersediaan media yang dibutuhkan untuk mendukung perkuliahan/praktikum Mesin-mesin Listrik atau Sistem Proteksi khususnya materi sistem kendali berkinerja tinggi motor induksi tiga fase?
2. Mempertimbangkan aspek efisiensi biaya, fleksibilitas dan kenyamanan penggunaan, jenis media apa yang perlu dikembangkan?
3. Bagaimana rumusan tujuan pembelajaran Mesin-mesin Listrik dan Sistem Proteksi, khususnya terkait dengan media yang dikembangkan?
4. Keterampilan teknis apa saja yang diharapkan dapat ditumbuhkan melalui penerapan media yang dikembangkan?

5. Seperti apakah spesifikasi dan model konseptual dari media yang dikembangkan?
6. Seperti apakah bentuk media/perangkat pembelajaran sistem kendali motor induksi berkinerja tinggi yang dikembangkan?
7. Apakah media yang dikembangkan memiliki kinerja yang baik?
8. Seberapa jauh kelayakan media yang dikembangkan sebagai perangkat pembelajaran sistem kendali motor induksi berkinerja tinggi?
9. Bagaimanakah persepsi pengguna dari media yang dikembangkan?

Untuk menyelesaikan masalah-masalah tersebut, kajian dalam monograf ini menggunakan metode pengembangan media pembelajaran ADDIE (*analysis, design, development, implementation, evaluation*) yang telah dikembangkan oleh Molenda & Boling (2008: 109) dan pernah digunakan oleh Branch & Deissler (2008: 207). Pengujian kinerja sistem kendali motor induksi berkinerja tinggi, sebagai bagian utama dari unsur media yang dikembangkan, divalidasi melalui eksperimen simulatif dalam rangkaian evaluasi formatif *on-going testing*, sedangkan kelayakannya sebagai media pembelajaran divalidasi oleh para ahli pembelajaran melalui evaluasi formatif *alpha testing* dan pengguna dalam *beta testing*. Dampak dari penggunaan media yang dikembangkan berupa persepsi pengguna diuji melalui evaluasi sumatif.

C. Tujuan dan Manfaat

Tujuan kajian dalam monograf ini adalah untuk menghasilkan sebuah referensi yang dapat digunakan untuk mempermudah pengembangan perangkat pembelajaran sistem kendali motor induksi tiga fase berkinerja tinggi yang layak, fleksibel, aman dan efisien, baik dipakai sebagai media mengajar klasikal, praktik laboratorium, maupun belajar mandiri. Melalui monograf ini dideskripsikan secara detil proses pengembangan perangkat pembelajaran sistem kendali motor berkinerja tinggi yang di dalamnya terdapat unit *soft-starter* dan unit *stall detection* berbasis perangkat lunak

SIMULINK. Selain itu, monograf ini juga bertujuan untuk menyediakan referensi berupa informasi hasil uji kinerja dan persepsi pengguna dosen, guru dan mahasiswa terhadap penggunaan perangkat pembelajaran yang dikembangkan oleh penulis sebagai peneliti.

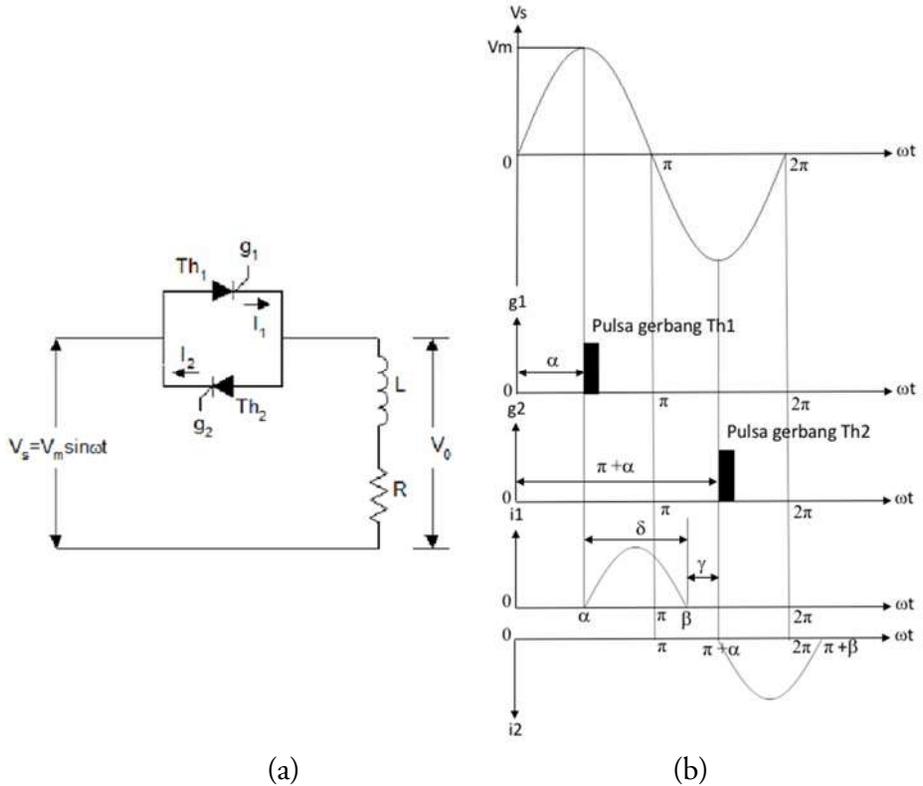
Monograf ini dapat dimanfaatkan oleh dosen teknik elektro dan guru Sekolah Menengah Kejuruan (SMK) sebagai referensi untuk merancang kegiatan pembelajaran di kelas dengan pendekatan demonstrasi, maupun praktik di laboratorium (pengganti praktik *hands-on*) secara simulatif untuk materi pengendalian motor induksi tiga fase menggunakan *thyristor*. Topik-topik praktik yang dapat diselenggarakan dengan simulator yang ada di dalam monograf ini antara lain karakteristik dinamis motor induksi tiga fase dengan *direct-on-line supplied*, *soft starter* dan *stall detector*, serta analisis bentuk gelombang tegangan dan arus motor dengan pengendali tegangan oleh *thyristor*. Selain itu, monograf juga dapat digunakan sebagai referensi bagi peneliti yang tertarik melakukan riset pengembangan perangkat pembelajaran yang terkait dengan implementasi simulator berbasis SIMULINK dari Matlab, khususnya untuk bidang pengendalian motor induksi berkinerja tinggi dengan menggunakan piranti *thyristor* sebagai *voltage controller*.

II | PENGENDALIAN MOTOR INDUKSI MENGUNAKAN *THYRISTOR*

Teknik pengendalian motor induksi yang digunakan dalam kajian ini adalah jenis pengendalian tegangan (*voltage controller*) oleh *thyristor* terpicu. Pengendalian tegangan pada sistem tiga fase menggunakan *thyristor* terpicu dengan beban motor induksi, dapat disusun dalam konfigurasi *star* untuk keduanya (*thyristor* dan motor), konfigurasi *delta* untuk keduanya atau salah satu membentuk konfigurasi *star* dan lainnya *delta* atau sebaliknya. Kajian ini memilih konfigurasi *star* untuk motor maupun *thyristor*.

A. Prinsip Kerja

Prinsip kerja pengendali tegangan tersebut mengacu pada watak piranti semi konduktor *thyristor* sebagai saklar yang pada suatu saat dapat mengalirkan arus dan saat yang lain berfungsi memutus arus. Sifat sebagai saklar ini dapat terjadi karena *thyristor* dilengkapi dengan elektrode *gate* yang berfungsi sebagai pintu masukan sinyal *trigger* untuk mengatur fungsi menghantar (ON) dan tak menghantar (OFF) antara elektrode anode dan katodenya. *Thyristor* akan bersifat sebagai saklar ON apabila pada *gate* yang ada diberi sinyal pemicu (*trigger*), dan menurut Mohan, Undeland & Robbins (2003: 18), pada saat *thyristor* ON tegangan *drop* yang muncul pada ujung-ujungnya berkisar 1 sampai dengan 3 volt. Perubahan dari keadaan ON ke OFF terjadi apabila tegangan anode *thyristor* bernilai lebih negatif dibandingkan tegangan katodenya. Kecepatan berubah dari keadaan ON ke OFF atau sebaliknya akan berbeda untuk setiap jenis *thyristor*, dan tergantung pada spesifikasinya. Penjelasan tentang pengendali tegangan dengan sistem tiga fase akan lebih mudah dijabarkan dengan mendeskripsikan terlebih dahulu sistem satu fase seperti ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1.

Pengendali Tegangan 1-Fase dengan *Thyristor*:

(a) Rangkaian, (b) Bentuk Gelombang Tegangan Sumber, Pulsa Pemicu, dan Arus yang Lewat *Thyristor*

Keterangan notasi untuk gambar 1 adalah V_s menunjukkan tegangan sumber berbentuk sinus yang besarnya tergantung waktu, V_m tegangan maksimum dari V_s , V_o tegangan pada beban, L dan R masing-masing induktansi dan resistansi sebagai beban rangkaian. Notasi Th_1 , g_1 , Th_2 dan g_2 berturut-turut adalah *thyristor* 1, *gate* dari *thyristor* 1, *thyristor* 2, dan *gate* dari *thyristor* 2, sedangkan i_1 dan i_2 adalah arus yang lewat *thyristor* 1 dan *thyristor* 2. Cara kerja pengendali tegangan 1-fase dapat dijelaskan dengan merujuk Gambar 1 (b) dengan asumsi beban resistif-induktif tidak mengandung gaya gerak listrik (GGL) lawan atau *back EMF*. Ketika pulsa pemicu diberikan pada sudut pemicuan (*firing angle*) α melalui g_1 , karena

tegangan sumber V_s fasenya positif, maka saat $\omega t = \alpha$, *thyristor* Th_1 ON dan mengalirkan arus i_1 ke beban L dan R . Telah diketahui bahwa pada beban resistif-induktif dengan sumber tegangan berbentuk sinus, arus akan terlambat dibandingkan tegangannya, oleh sebab itu, walaupun tegangan sumber sudah mencapai nilai nol yakni saat $\omega t = \pi$, arus i_1 terus mengalir hingga mencapai nilai nol pada $\omega t = \beta$. Sudut β disebut sebagai sudut pemadaman (*extinction angle*) karena saat $\omega t = \beta$, *thyristor* Th_1 padam (OFF) sehingga tidak mengalirkan arus. Jadi, pada saat ON, *thyristor* Th_1 mengalirkan arus dari $\omega t = \alpha$ sampai dengan $\omega t = \beta$ atau selama $\delta = \beta - \alpha$, sehingga sudut δ disebut sebagai sudut hantar *thyristor* (*conduction angle*). Selain tergantung pada nilai α , besarnya sudut hantar *thyristor* juga tergantung pada sudut faktor daya beban atau beda fase θ .

Untuk rentang waktu $\omega t = \beta$ sampai dengan $\omega t = \pi$, oleh karena pulsa pemicu belum diberikan, maka kedua *thyristor* dalam keadaan OFF, akibatnya tidak ada arus yang mengalir melalui beban. Oleh karena pada selang waktu ini kedua *thyristor* dalam keadaan OFF dan tidak mengalirkan arus, maka interval waktunya disebut sebagai sudut tak hantar *thyristor* (*holdoff angle*), diberi notasi γ . Ketika pulsa pemicu diberikan pada $\omega t = \pi + \alpha$ melalui *gate* g_2 , anode Th_2 lebih positif dibandingkan katodenya sehingga Th_2 ON dan mengalirkan arus dalam arah negatif sampai dengan Th_2 OFF yakni pada $\omega t = \pi + \beta$. Arus sesaat i_1 dan i_2 yang dilewatkan oleh *thyristor* Th_1 dan Th_2 , dapat diturunkan dari persamaan,

$$L \frac{di_1}{dt} + Ri_1 = V_m \sin \omega t \quad \text{persamaan (1)}$$

Persamaan (1) adalah bentuk dari *ordinary differential equation* orde satu yang dapat diselesaikan dengan berbagai metode yang tersedia. Mengacu pada penyelesaian yang dilakukan oleh Dewan, Slemon, & Straughen (1984: 60-61) dan Smith & Alley (1992: 283-285) dengan melakukan penyesuaian untuk rangkaian ekuivalen motor induksi 1-fase, penyelesaian persamaan (1) dapat ditulis dalam bentuk seperti pada persamaan (2).

$$i_1 = \frac{Vm}{\sqrt{R^2+(\omega L)^2}} \sin(\omega t - \theta) - \frac{Vm}{\sqrt{R^2+(\omega L)^2}} \sin(\alpha - \theta) e^{(\alpha-\omega t)R/\omega L}$$

persamaan (2)

Walaupun rumusan arus *thyristor* pada persamaan (2) tidak memunculkan variabel sudut β , namun besaran ini dapat ditentukan secara iteratif. Berdasarkan gambar 1 (b), terlihat bahwa sudut β terjadi ketika arus sama dengan nol atau $i_1(\omega t=\beta)=0$. Dengan demikian, persamaan (2) dapat ditulis dalam bentuk seperti pada persamaan (3).

$$0 = \frac{Vm}{\sqrt{R^2+(\omega L)^2}} \sin(\beta - \theta) - \frac{Vm}{\sqrt{R^2+(\omega L)^2}} \sin(\alpha - \theta) e^{(\alpha-\beta)R/\omega L}$$

persamaan (3)

Persamaan (3) memberikan penjelasan bahwa jika $i_1=0$, maka $\omega t = \beta$. Jika iterasi dilakukan terhadap persamaan (2) dalam interval waktu antara $\omega t=0$ sampai dengan $\omega t=2\pi$, maka akan dapat ditentukan nilai β yakni $\beta = \omega t$ ketika $i_1=0$. Dari gambar 1 (b) juga dapat ditemukan hubungan dari sudut-sudut yang ada, antara lain sudut hantar *thyristor* yakni,

$$\delta = \beta - \alpha$$

persamaan (4)

dan sudut tak hantar *thyristor* yakni,

$$\gamma = \pi + \alpha - \beta$$

persamaan (5)

Merujuk persamaan (4) dan persamaan (5), apabila melalui proses iteratif menggunakan persamaan (2) nilai β dapat ditentukan, maka nilai δ dan γ dapat ditemukan.

Berdasarkan persamaan (2), jika sudut pemicuan *thyristor* $\alpha=\theta$, maka akan diperoleh hubungan sebagai berikut,

$$i_1 = \frac{Vm}{\sqrt{R^2+(\omega L)^2}} \sin(\omega t - \theta)$$

persamaan (6)

dan merujuk persamaan (3) dapat dituliskan,

$$\sin(\beta - \theta) = \sin(\beta - \alpha) = 0 \quad \text{persamaan (7)}$$

sehingga

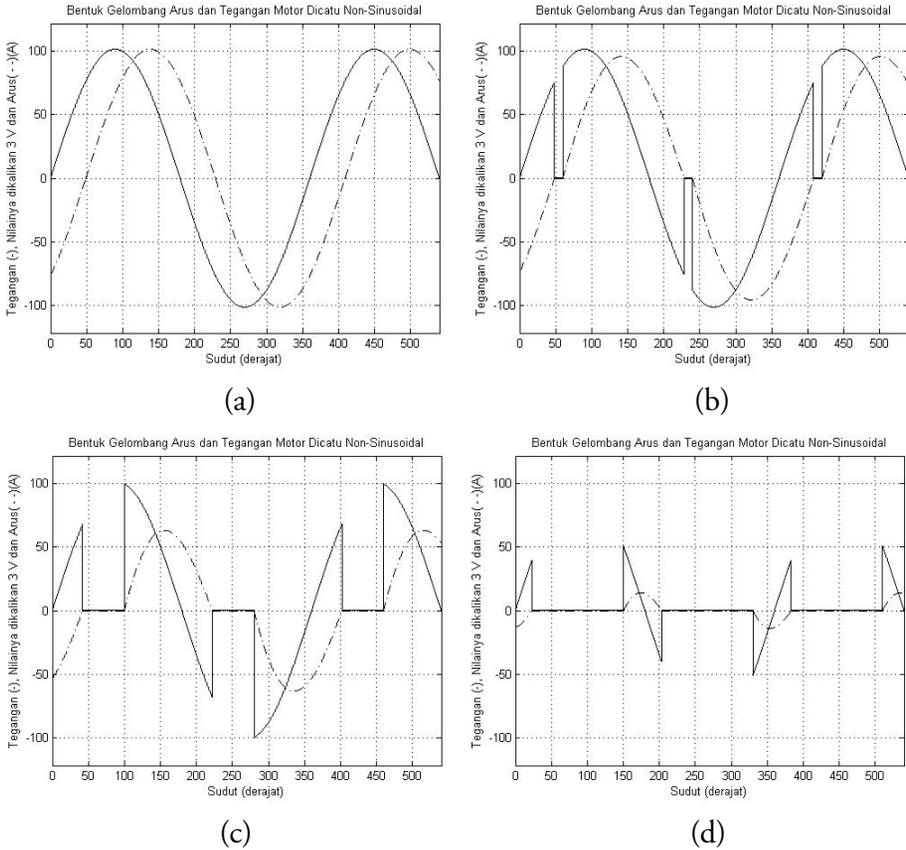
$$\beta - \alpha = \delta = \pi, \text{ dan } \gamma = 0 \quad \text{persamaan (8)}$$

Persamaan (6), persamaan (7), dan persamaan (8) di atas memberikan pengertian bahwa jika sudut pemecuan nilainya sama dengan sudut beda fase yakni $\alpha = \theta$, maka arus yang mengalir pada beban akan tertinggal sebesar θ terhadap tegangannya, dan akan berbentuk sinusoidal murni. Dalam hal ini sudut hantar δ tidak mungkin lebih besar dari π dan sudut pemecuan α tidak mungkin lebih kecil dari θ , sehingga nilai sudut pemecuan adalah,

$$\theta \leq \alpha \leq \pi \quad \text{persamaan (9)}$$

Dari persamaan (2) juga terlihat bahwa arus beban menjadi tidak kontinyu dan tidak sinusoidal jika sudut pemecuan α lebih besar dari sudut faktor daya beban θ seperti ditunjukkan pada gambar 1(b) di atas.

Dengan melakukan proses komputasi iteratif menggunakan persamaan (2) dan didukung oleh persamaan (4) sampai dengan persamaan (9), hasil simulasi menggunakan program Matlab untuk parameter motor Induksi 1-fase: $R_s=2,02 \ \Omega$, $R_r=4,12 \ \Omega$, $X_s=2,32 \ \Omega$, $X_r=1,76 \ \Omega$, $X_m=55,67 \ \Omega$, $V_{rated}=220 \ \text{V}$, $I_{rated}=2,5 \ \text{A}$, $f=50 \ \text{Hz}$, dan $\omega_{rated}=1440 \ \text{rpm}$ ditunjukkan pada gambar-gambar berikut ini.



Gambar 2.

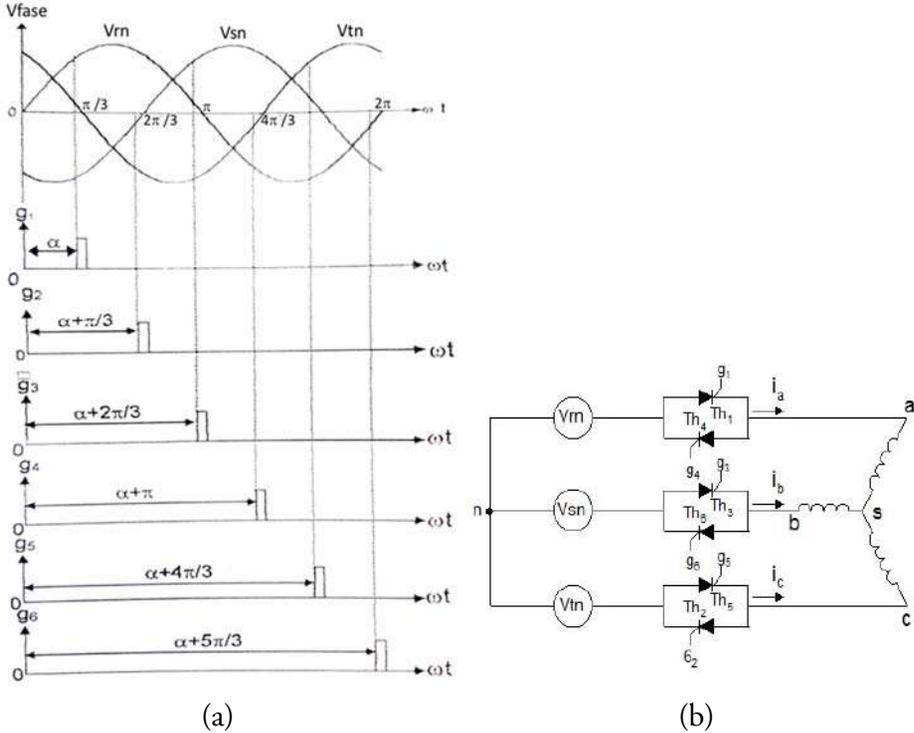
Bentuk Gelombang Arus dan Tegangan Motor Induksi 1-Fase Dicu
 dengan Tegangan Terkendali Thyristor:

(a) $\alpha = \theta = 49^\circ$, (b) $\alpha = 60^\circ$, (c) $\alpha = 100^\circ$, dan (d) $\alpha = 150^\circ$

B. Pengendali Tegangan Menggunakan *Thyristor* Untuk Beban Motor Tiga Fase

Mengacu pada teori yang digunakan dalam penelitiannya Muchlas (1998: 41), dan teori yang dikembangkan oleh Rahman (2011: 925), pengendali tegangan dengan *thyristor* terpicu untuk keperluan catu daya motor induksi tiga fase ditunjukkan pada gambar 3. Dengan mengacu pada konfigurasi pengendali tegangan 1-fase, pada pengendali tegangan tiga fase diperlukan enam buah *thyristor* yang membentuk tiga pasang masing-

masing dalam konfigurasi anti paralel (*back-to-back*). Setiap pasangan anti paralel tersebut dihubungkan secara seri dengan terminal sumber tegangan dan terminal stator dari motor.



Gambar 3.

Pengendali Tegangan Tiga Fase Menggunakan *Thyristor* Terpicu Dengan Beban Motor Induksi: (a) Urut-urutan Pemicuan, (b) Rangkaian

Untuk membangun pengendali tegangan dengan sistem tiga fase, perlu dirancang terlebih dahulu urutan-urutan pemicuan yang dilakukan oleh *firing circuit* terhadap semua *thyristor* yang terpasang pada setiap fase sumber. Langkah-langkahnya dapat dilakukan dengan prosedur sebagai berikut: (1) menggambar tegangan sumber untuk semua fase dalam bentuk sinus dengan selisih fase masing-masing sebesar 120° listrik atau $2\pi/3$ dengan diberi nama misalnya V_m , V_{sn} dan V_{ns} ; (2) menggambar semua pulsa yang diperlukan untuk memicu semua *thyristor* sesuai urutan yang benar, yakni

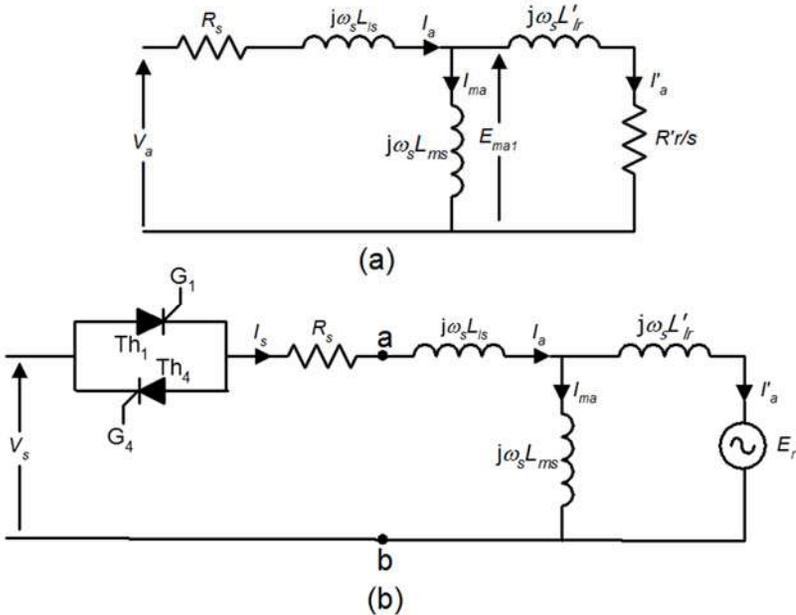
$g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6$ diberikan pada sudut $\alpha, \alpha+\pi/3, \alpha+2\pi/3, \alpha+3\pi/3, \alpha+4\pi/3,$ dan $\alpha+5\pi/3$ seperti pada Gambar 3 (a); serta (3) menggambar rangkaian pengendali tegangan tiga fase sesuai urutan pemicuan yang telah dirancang seperti pada Gambar 3 (b).

Gambar 3 memperlihatkan bahwa untuk membangun pengendali tegangan dengan sistem tiga fase diperlukan enam buah pulsa pemicu yang masing-masing memiliki selisih sudut sebesar $\pi/3$ atau 60° listrik. Sedangkan setiap pasangan *thyristor* anti paralel memerlukan dua buah pulsa yang memiliki selisih sudut π . Pada jalur fase V_m *thyristor* Th_1 dan Th_4 dipicu oleh pulsa g_1 dan pulsa g_4 yang berjarak π . Dalam hal ini, *thyristor* Th_1 dipicu oleh g_1 pada saat $\omega t = \alpha$, sehingga V_m mulai muncul pada fase positifnya. Pasangan *thyristor* Th_1 yakni *thyristor* Th_4 akan dipicu pada saat $\omega t = \pi + \alpha$ yang mengakibatkan munculnya tegangan V_m pada fase negatifnya. Pada sistem tiga fase, selisih fase yang satu terhadap fase lainnya adalah 120° listrik atau $2\pi/3$, sehingga pemicuan berikutnya terhadap *thyristor* yang terhubung dengan fase V_{sn} dilakukan melalui g_3 pada $\omega t = \alpha + 2\pi/3$ untuk fase tegangan positif, sedangkan untuk fase negatif dari V_{sn} , pulsa pemicu diberikan ke g_6 pada $\omega t = \alpha + 5\pi/3$. Untuk fase positif dari V_m , pulsa pemicu Th_5 diberikan melalui g_5 pada $\omega t = \alpha + 4\pi/3$, sedangkan untuk fase negatifnya pulsa pemicu Th_2 diberikan pada $\omega t = \alpha + \pi/3$.

1. Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Dicatu Tegangan Bukan Sinus

Analisis terhadap motor induksi yang dicatu menggunakan sistem tegangan tiga fase terkendali *thyristor* telah dilakukan oleh banyak peneliti. Teori yang digunakan pada monograf ini akan menggunakan analisis yang pernah dilakukan oleh Hamed & Chalmers (1990: 184-193) dan pernah digunakan oleh Muchlas (1998: 43-60) sebagai teori dalam tesisnya.

Analisis untuk memperoleh penyelesaian bentuk gelombang arus dan tegangan pada motor induksi tiga fase yang dicatu dengan tegangan berbentuk non-sinus menurut Hamed & Chalmers (1990) dapat dilakukan dengan mengubah rangkaian ekivalen motor induksi ke dalam bentuk yang mempertimbangkan munculnya GGL (gaya gerak listrik) lawan (*back EMF*) pada beban motor. Gambar berikut ini merupakan rangkaian ekivalen asli dan rangkaian ekivalen yang telah diubah bentuknya.



Gambar 4.

Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Tiga Fase: (a) Rangkaian Asli, (b) Rangkaian dengan Mempertimbangkan GGL Balik atau *Back EMF* (Hamed & Chalmers, 1990)

Motor induksi sebagai suatu beban dari rangkaian listrik bolak-balik memiliki karakteristik tersendiri. Pada umumnya rangkaian ekivalen motor induksi hanya digambarkan dalam bentuk gabungan beban resistif dan induktif, namun dalam kenyataannya motor induksi mengandung tambahan beban GGL lawan. Oleh sebab itu, rangkaian

ekivalen motor induksi perlu dilakukan modifikasi agar sesuai dengan kenyataannya dengan mempertimbangkan munculnya GGL lawan. Struktur motor induksi yang terdiri atas belitan stator dan belitan rotor adalah penyebab munculnya GGL lawan ini. Pada satu sisi, untuk memutar rotor diperlukan catu tegangan pada bagian stator, namun pada sisi lain setelah motor berputar, rotor akan membangkitkan arus induksi yang disebabkan karena adanya interaksi gaya putar belitan stator dengan medan magnet yang dibangkitkan oleh stator. Memang, interaksi antara medan magnet stator dengan arus rotor dapat membangkitkan torsi motor, namun, ketika belitan rotor sudah berputar, terjadi interaksi antara belitan konduktor rotor yang berputar dengan medan magnet. Interaksi tersebut dapat membangkitkan arus induksi pada rotor sehingga menimbulkan GGL yang arahnya berlawanan dengan tegangan catu.

Agar analisis dapat dilakukan lebih mudah, rangkaian ekivalen pada gambar 4 (b) perlu disederhanakan. Berdasarkan Gambar 4, jika digunakan teorema *Thevenin*, dan dengan mempertimbangkan bahwa nilai L_{ms} jauh lebih besar daripada L'_{lr} maka rangkaian dapat diubah menjadi seperti pada gambar 5 dengan,

$$V_{OC} = E_r \frac{L_{ms}}{L_{ms} + L'_{lr}} \quad \text{persamaan (10)}$$

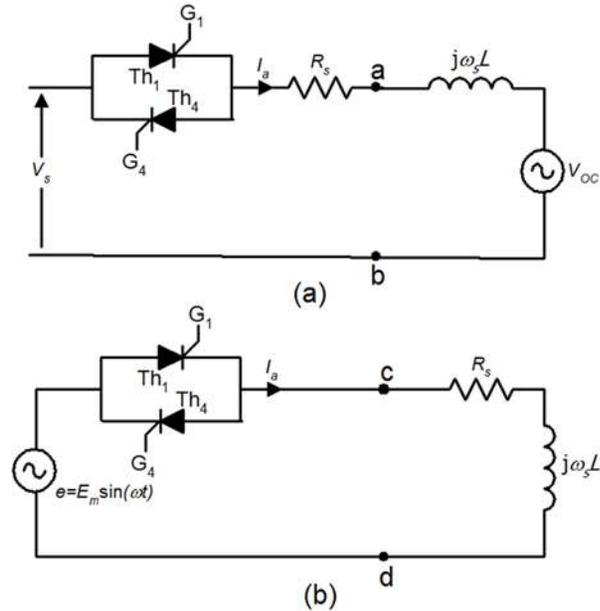
dapat pula ditulis dalam bentuk,

$$V_{OC} = I'_a \left(\frac{R'_r}{s_1} \right) \left(\frac{L_{ms}}{L_{ms} + L'_{lr}} \right) \quad \text{persamaan (11)}$$

dapat diperoleh pula,

$$L = L_{ls} + \frac{L_{ms}L'_{lr}}{L_{ms} + L'_{lr}} \quad \text{persamaan (12)}$$

dengan $L = L_{ls} + L'_{lr}$, karena $L_m > L'_{lr}$. persamaan (13)



Gambar 5.

Rangkaian Ekuivalen Sederhana dari Gambar 4
(Hamed & Chalmers, 1990)

Nilai s_1 pada persamaan (11) di atas didefinisikan sebagai:

$$s_1 = \frac{(\omega_{syn} - \omega_m)}{\omega_{syn}} \quad \text{persamaan (14)}$$

dengan ω_m adalah kecepatan putar rotor dan ω_{syn} merupakan kecepatan angular sinkron yang didenifisikan sebagai,

$$\omega_{syn} = \frac{2\omega_s}{p} \quad \text{persamaan (15)}$$

dan ω_s sebagai frekuensi angular sumber tegangan.

Jika gambar 4 (a) diperhatikan kembali, arus rotor yang didefinisikan dalam fungsi arus stator dapat diturunkan melalui proses berikut ini. Oleh karena L_{ms} terpasang paralel terhadap L'_{lr} dan $\frac{R'_r}{s_1}$, maka tegangan pada ujung-ujung L_{ms} dapat ditulis sebagai,

$$I'_a \sqrt{\left(\frac{R'_r}{s_1}\right)^2 + (X_{lr})^2} = I_{ma} X_{ms}$$

dan

$$I_{ma} = \frac{\sqrt{\left(\frac{R'_r}{s_1}\right)^2 + (X_{lr})^2}}{X_{ms}} I'_a \quad \text{persamaan (16)}$$

Arus stator adalah penjumlahan dari arus rotor dan arus yang lewat inductor L_{ms} , sehingga,

$$I_a = I'_a + I_{ma} \quad \text{persamaan (17)}$$

Substitusi persamaan (16) ke dalam persamaan (17) menghasilkan hubungan,

$$I'_a = \frac{X_{ms}}{\sqrt{\left(\frac{R'_r}{s_1}\right)^2 + (X_{ms} + X_{lr})^2}} I_a \quad \text{persamaan (18)}$$

Tampak bahwa arus rotor I'_a mendahului arus stator I_a dan beda fase keduanya sebesar,

$$\phi = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{X_{ms} + X_{lr}}{R'_r/s_1} \right) \quad \text{persamaan (19)}$$

Selanjutnya dapat dituliskan hasil substitusi persamaan (11) ke dalam persamaan (18) sebagai,

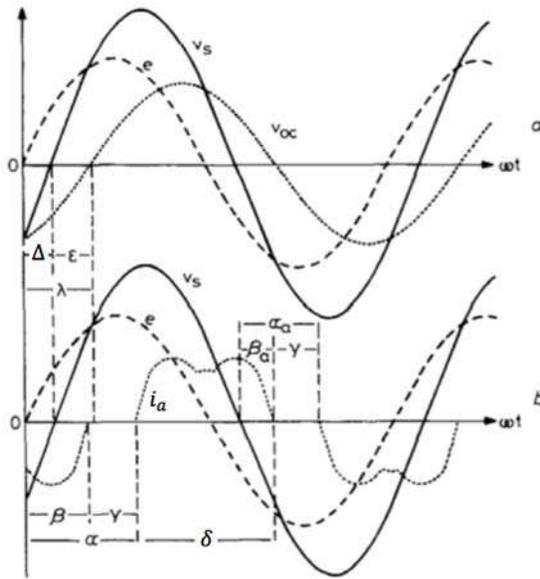
$$V_{OC} = C \cdot I_a \quad \text{persamaan (20)}$$

dengan nilai C sebesar,

$$C = \frac{(R'_r/s_1) X_{ms}^2}{(X_{ms} + X'_{lr}) \cdot \sqrt{\left(\frac{R'_r}{s_1}\right)^2 + (X_{ms} + X_{lr})^2}} \quad \text{persamaan (21)}$$

Persamaan (20) dan persamaan (21) memberikan gambaran bahwa tegangan V_{OC} berbanding linear dengan arus stator dengan faktor kesebandingan C . Faktor kesebandingan C pada dasarnya adalah suatu impedansi yang dapat ditentukan nilainya berdasarkan parameter-parameter motor dan *slip*. Dengan demikian rangkaian motor induksi yang dicatu dengan tegangan non-sinus dapat diganti oleh suatu rangkaian yang mengandung GGL lawan tersusun secara seri dengan suatu induktansi pengganti. Nilai induktansi pengganti ini dapat ditentukan berdasarkan parameter dari suatu model motor yang diketahui.

Jika gambar 5 (a) diperhatikan, oleh karena tegangan sumber V_s dan tegangan V_{OC} berbentuk sinus, maka rangkaian dapat disederhanakan lagi menjadi rangkaian seperti pada gambar 5 (b) dengan hanya terdiri atas satu sumber tegangan yakni $e = E_m \sin(\omega t)$. Dalam hal ini E merupakan nilai efektif (*root mean square*) dari e (perbedaan fasor V_s dan V_{OC}) dan I_a merupakan bagian bersama dari kedua rangkaian tersebut. Rangkaian ekuivalen pada Gambar 5 (b) mirip dengan Gambar 1(a) yakni pengendali tegangan dengan *thyristor* menggunakan beban resistif-induktif murni tanpa GGL lawan. Oleh sebab itu, untuk memperoleh bentuk gelombang arus pada berbagai sudut pemicuan perlu ditentukan terlebih dahulu hubungan antara sudut pemicuan aktual α_a dan sudut pemadaman aktual β_a yang digunakan pada rangkaian Gambar 5 (a) dan α serta β yang digunakan pada Gambar 5 (b). Untuk memperoleh hubungan tersebut perlu disajikan terlebih dahulu diagram yang menunjukkan hubungan antara bentuk gelombang arus dan tegangan pada gambar 5 (a) dan Gambar 5 (b) sebagai berikut.



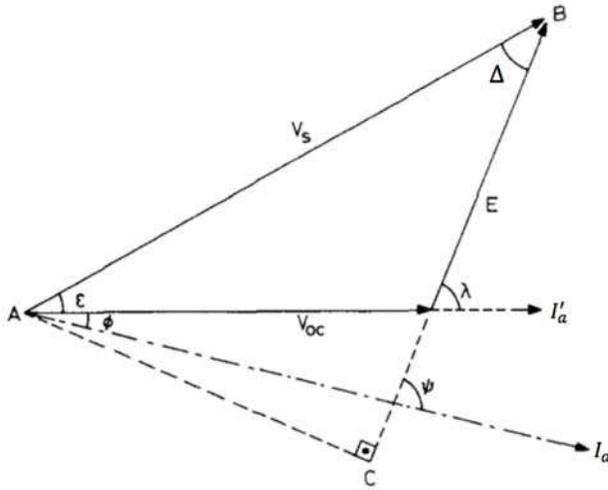
Gambar 6.
 Hubungan Antara Rangkaian Asli dan Termodifikasi
 (Hamed & Chalmers, 1990)

Dari Gambar 6 (b) dapat disusun hubungan sebagai berikut.

$$\alpha_a = \alpha - \Delta \quad \text{persamaan (22)}$$

$$\beta_a = \beta - \Delta \quad \text{persamaan (23)}$$

dengan Δ merupakan perbedaan antara tegangan sumber V_s dan E . Untuk menentukan besarnya Δ dapat dilakukan secara grafis melalui diagram fasor dari rangkaian termodifikasi.



Gambar 7.

Diagram Fasor Rangkaian Ekuivalen Termodifikasi
(Hamed & Chalmers, 1990)

Merujuk Gambar 7, nilai sudut Δ dapat ditentukan sebesar,

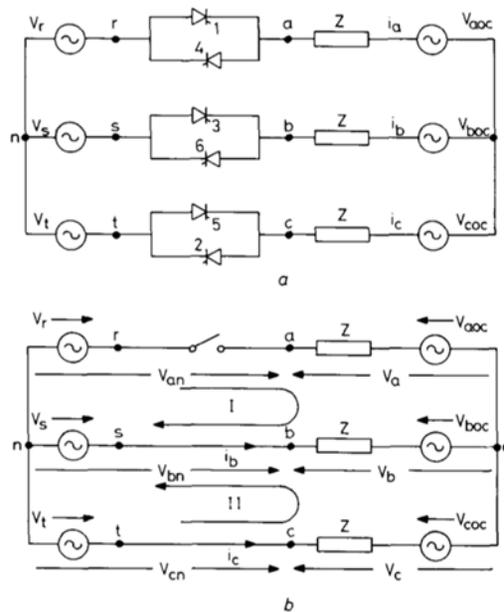
$$\Delta = \cos^{-1} \left(\frac{E^2 + V_s^2 - V_{oc}^2}{2E \cdot V_s} \right) \quad \text{persamaan (24)}$$

dan hubungan sudut tak hantar *thyristor* (γ) dengan sudut-sudut lainnya dinyatakan dalam bentuk,

$$\gamma = \alpha - \beta = \alpha_a - \beta_a \quad \text{persamaan (25)}$$

2. Tegangan Eksitasi

Jika pada rangkaian ekuivalen yang disajikan melalui Gambar 5 (a) susunan resistansi R_s dan induktansi $j\omega_s L$ membentuk sebuah impedansi Z , maka rangkaian motor induksi yang dicatu dengan sistem tiga fase pada Gambar 3 (b) dapat disusun ulang seperti pada Gambar 8 berikut ini.



Gambar 8.

Rangkaian Ekuivalen Sistem Tiga Fase dengan Mempertimbangkan
 GGL Lawan (Hamed & Chalmers, 1990)

Untuk menentukan nilai tegangan eksitasi V_{an} , V_{bn} dan V_{cn} , perlu diperhatikan terlebih dahulu keadaan-keadaan *thyristor* anti paralel yang ada, yakni: (1) salah satu dari *thyristor* pada suatu fase dalam keadaan ON, sehingga tegangan eksitasinya sama dengan tegangan catu dari fase yang bersangkutan; dan (2) tidak ada *thyristor* yang ON dari suatu fase, sehingga menuntut dua fase sisanya harus dalam keadaan ON jika diinginkan terjadinya aliran arus pada motor. Pada Gambar 8 (b) ditunjukkan suatu kondisi salah satu *thyristor* dari fase a dalam keadaan OFF, yang menyebabkan *loop* I menjadi bersifat terbuka, sementara

pasangan *thyristor* di dua fase lainnya yakni fase b dan fase c dalam keadaan ON sehingga *loop* II tertutup. Jika dianggap tidak terdapat tegangan *drop* pada setiap *thyristor* saat ON, persamaan tegangan pada *loop* I dapat ditulis sebagai,

$$V_{ra} = V_r - V_s + V_b - V_{aOC} \quad \text{persamaan (26)}$$

Karena sistem tiga fase yang digunakan dianggap seimbang, maka akan berlaku,

$$V_a = V_{aOC} = -V_b - V_c \quad \text{persamaan (27)}$$

dan dari *loop* II dapat diperoleh,

$$V_c = V_b + V_t - V_s \quad \text{persamaan (28)}$$

sehingga gabungan persamaan (27) dan persamaan (28) akan menghasilkan,

$$V_b = 0,5(V_s - V_t - V_{aOC}) \quad \text{persamaan (29)}$$

Substitusi persamaan (29) ke dalam persamaan (26) menghasilkan,

$$V_{ra} = V_r - 0,5(V_s + V_t) - 1,5V_{aOC} \quad \text{persamaan (30)}$$

dan dengan menambahkan serta mengurangi nilai $0,5V_r$ pada sisi kanan persamaan (30) akan dihasilkan hubungan,

$$V_{ra} = 1,5(V_r - V_{aOC}) \quad \text{persamaan (31)}$$

Merujuk pada Gambar 8 (b) akan diperoleh,

$$V_{an} = V_r - V_{ra} \quad \text{persamaan (32)}$$

dan dengan melakukan substitusi persamaan (31) ke dalam persamaan (32) akan dihasilkan tegangan eksitasi pada fase a,

$$V_{an} = 1,5V_{aOC} - 0,5V_r \quad \text{persamaan (33)}$$

Hasil yang sama akan diperoleh jika cara yang sama diberlakukan pada penentuan tegangan eksitasi fase b dan dan fase c yakni,

$$V_{bn} = 1,5V_{bOC} - 0,5V_s \quad \text{persamaan (34)}$$

$$V_{cn} = 1,5V_{cOC} - 0,5V_t \quad \text{persamaan (35)}$$

Persamaan (33), persamaan (34) dan persamaan (35) memperlihatkan bahwa nilai tegangan eksitasi dari masing-masing fase selain tergantung pada tegangan catu, juga tergantung pada nilai GGL lawan yang dibandingkan oleh belitan stator, dan GGL lawan tergantung pada kondisi pembebanan yang diwakili oleh besarnya slip dari motor.

3. Tegangan Terminal

Beberapa kemungkinan situasi yang terjadi pada operasi motor induksi tiga fase yang dicatu dengan *thyristor* terpicu perlu mendapat perhatian sebelum melakukan perhitungan tegangan terminal masing-masing fase. Keadaan pertama, jika fase yang ditinjau memiliki *thyristor* dalam keadaan ON, dan *thyristor* pada kedua fase sisanya juga dalam keadaan ON, maka GGL lawan tidak memberikan efek terhadap tegangan terminal catu, artinya tegangan fase sama dengan tegangan catunya dan dalam hal ini,

$$V_a=V_r, V_b=V_s, \text{ dan } V_c=V_t, \quad \text{persamaan (36)}$$

namun, jika terdapat satu di antara *thyristor* yang ada pada fase-fase sisanya dalam keadaan OFF, misalnya pada Gambar 8 *thyristor* 5 OFF, maka fase c menjadi rangkaian terbuka, sehingga tegangan terminal fase a dan fase b sama dengan tegangan catunya, sementara tegangan terminal face c dipengaruhi oleh GGL lawan, dan dalam hal ini dapat diperoleh hubungan,

$$\begin{aligned}
 V_{an} &= V_r \\
 V_{bn} &= V_s \\
 V_{cn} &= 1,5V_{cOC} - 0,5V_t
 \end{aligned}
 \tag{persamaan (37)}$$

Berdasarkan Gambar 8 (b), tegangan eksitasi setiap fase dapat ditulis kembali dalam bentuk,

$$\begin{aligned}
 V_{an} &= V_{on} + V_a \\
 V_{bn} &= V_{on} + V_b \\
 V_{cn} &= V_{on} + V_c
 \end{aligned}
 \tag{persamaan (38)}$$

Oleh karena dalam sistem tiga fase yang seimbang berlaku hubungan,

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \tag{persamaan (39)}$$

maka gabungan persamaan (38) dan persamaan (39) menghasilkan persamaan,

$$V_{on} = \frac{V_{an} + V_{bn} + V_{cn}}{3} \tag{persamaan (40)}$$

Substitusi persamaan (37) ke dalam persamaan (40) akan menghasilkan hubungan,

$$V_{on} = 0,5(V_{cOC} - V_t) \tag{persamaan (41)}$$

Persamaan yang merepresentasikan besarnya tegangan terminal dari suatu fase yang sedang dianalisis yakni fase a dengan fase a tertutup, fase b tertutup, fase c terbuka, dapat diperoleh dengan menggabungkan persamaan (37), persamaan (38), dan persamaan (41) sehingga menghasilkan,

$$V_a = 0,5(V_{rs} - V_{cOC}) \tag{persamaan (42)}$$

Jika cara yang sama digunakan untuk kondisi fase a tertutup, fase b terbuka dan fase c tertutup dapat diperoleh tegangan terminal fase a sebesar,

$$V_a = 0,5(V_{rt} - V_{bOC}) \quad \text{persamaan (43)}$$

Keadaan kedua adalah semua *thyristor* pada fase yang ditinjau OFF. Jika dilihat kembali persamaan (37), terlihat bahwa persamaan tersebut berlaku untuk fase a, fase b dalam keadaan tertutup dan fase c terbuka. Untuk kasus fase a terbuka dan fase lainnya tertutup, maka persamaan (37) dapat diubah bentuknya menjadi,

$$\begin{aligned} V_{an} &= 1,5V_{aOC} - 0,5V_r \\ V_{bn} &= V_s \\ V_{cn} &= V_t \end{aligned} \quad \text{persamaan (44)}$$

dan persamaan (41) menjadi,

$$V_{on} = 0,5(V_{aOC} - V_r) \quad \text{persamaan (45)}$$

Kombinasi persamaan (38), persamaan (44), dan persamaan (45) menghasilkan hubungan,

$$\begin{aligned} V_{an} &= V_{on} + V_a \\ 1,5V_{aOC} - 0,5V_r &= 0,5(V_{aOC} - V_r) + V_a \\ \therefore V_a &= V_r \end{aligned} \quad \text{persamaan (46)}$$

4. Bentuk Gelombang Tegangan dan Arus Stator

Pada bagian awal telah dikemukakan bahwa motor induksi yang dicatu menggunakan tegangan non-sinus, rangkaian ekivalennya dapat disusun dengan menggunakan sebuah sumber tegangan $e(t)$ yang merupakan selisih antara tegangan catu dan GGL lawan, dihubungkan secara seri dengan sebuah impedansi. Oleh karena sumber tegangan non-sinus yang digunakan ini diimplementasikan dengan pengendali *thyristor* terpicu yang memerlukan pulsa pemicu dengan sudut pemicuan

tertentu, maka pengaturan sudut pemucuan α akan merujuk pada titik persilangan nol yang dihasilkan oleh tegangan $e(t)$. Berdasarkan Gambar (6) dan Gambar (7), tegangan catu asli dapat dituliskan dalam bentuk seperti pada persamaan-persamaan berikut ini.

$$\begin{aligned} v_r &= V_m \sin(\omega t - \Delta) \\ v_s &= V_m \sin(\omega t - \Delta - 2\pi/3) \\ v_t &= V_m \sin(\omega t - \Delta - 4\pi/3) \end{aligned} \quad \text{persamaan (47)}$$

Sedangkan persamaan-persamaan yang menunjukkan GGL lawan pada masing-masing fase ditunjukkan pada hubungan berikut ini.

$$\begin{aligned} v_{aOC} &= V_p \sin(\omega t - \lambda) \\ v_{bOC} &= V_p \sin(\omega t - \lambda - 2\pi/3) \\ v_{cOC} &= V_p \sin(\omega t - \lambda - 4\pi/3) \end{aligned} \quad \text{persamaan (48)}$$

Untuk melanjutkan analisis ini, Hamed & Chalmers (1990) menggunakan asumsi bahwa operasi motor hanya terjadi pada dua kondisi nilai γ yakni $\gamma < \pi/3$ dan $\gamma > \pi/3$. Tegangan terminal fase a untuk mode $\gamma < \pi/3$ pada kondisi selang waktu $\alpha < \omega t < \alpha + \pi$ ditunjukkan pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Persamaan Tegangan Terminal Fase a Untuk Mode $\gamma < \pi/3$

| Tegangan Fase | Persamaan | Selang Waktu | Rujukan Persamaan | Keadaan Thyristor Setiap Fase |
|-------------------|---|---|-------------------|-------------------------------|
| $v_a(\omega t) =$ | $v_r(\omega t)$ | $\alpha < \omega t < \beta + \pi/3$ | (45) | a = ON, b = ON, c = ON |
| | $0,5[v_{rs}(\omega t) - v_{coc}(\omega t)]$ | $\beta + \pi/3 < \omega t < \alpha + \pi/3$ | (42) | a = ON, b = ON, c = OFF |
| | $v_r(\omega t)$ | $\alpha + \pi/3 < \omega t < \beta + 2\pi/3$ | (45) | a = ON, b = ON, c = ON |
| | $0,5[v_{rt}(\omega t) - v_{boc}(\omega t)]$ | $\beta + 2\pi/3 < \omega t < \alpha + 2\pi/3$ | (43) | a = ON, b = OFF, c = ON |
| | $v_r(\omega t)$ | $\alpha + 2\pi/3 < \omega t < \beta + \pi$ | (45) | a = ON, b = ON, c = ON |
| | $v_{aoc}(\omega t)$ | $\beta + \pi < \omega t < \alpha + \pi$ | (46) | a = OFF, b = ON, c = ON |

persamaan (49)

Dalam Tabel 1, nilai $v_{rs}(\omega t)$ dan $v_{rt}(\omega t)$ didefinisikan sebagai,

$$\begin{aligned}
 v_{rs}(\omega t) &= \sqrt{3} \cdot V_m \sin(\omega t - \Delta + \pi/6) \\
 v_{rt}(\omega t) &= \sqrt{3} \cdot V_m \sin(\omega t - \Delta - \pi/6)
 \end{aligned}
 \tag{50}$$

Sedangkan untuk $\gamma > \pi/3$, tegangan terminal fase a dapat ditulis dalam bentuk seperti pada berikut ini.

Tabel 2. Persamaan Tegangan Terminal Fase a Untuk Mode $\gamma > \pi/3$

| Tegangan Fase | Persamaan | Selang Waktu | Rujukan Persamaan | Keadaan Thyristor Setiap Fase |
|-------------------|---|--|-------------------|-------------------------------|
| $v_a(\omega t) =$ | $0,5[v_{rs}(\omega t) - v_{oc}(\omega t)]$ | $\alpha < \omega t < \beta + 2\pi/3$ | (42) | a = ON, b = ON, c = OFF |
| | $v_{aOc}(\omega t)$ | $\beta + 2\pi/3 < \omega t < \alpha + \pi/3$ | (46) | a = OFF, b = ON, c = ON |
| | $0,5[v_{rt}(\omega t) - v_{bOc}(\omega t)]$ | $\alpha + \pi/3 < \omega t < \beta + \pi$ | (43) | a = ON, b = OFF, c = ON |
| | $v_{aOc}(\omega t)$ | $\beta + \pi < \omega t < \alpha + \pi$ | (46) | a = OFF, b = ON, c = ON |

persamaan (51)

Amplitudo nilai RMS dari tegangan terminal pada masing-masing mode dapat ditulis seperti pada persamaan (52) untuk mode $\gamma < \pi/3$,

$$V_a = [V_s^2 \left\{ 1 - \left(\frac{3}{2\pi}\right) (\alpha - \beta) + \left(\frac{3}{4\pi}\right) [\sin(2\alpha) - \sin(2\beta)] \right\} + V_{Oc}^2 \left\{ \left(\frac{3}{2\pi}\right) (\alpha - \beta) + \left(\frac{3}{4\pi}\right) [\sin(2\beta - 2\lambda) - \sin(2\alpha - 2\lambda)] \right\}]^{1/2}$$

persamaan (52)

dan pada persamaan (53) untuk mode $\gamma > \frac{\pi}{3}$, yakni,

$$V_a = [V_s^2 \left\{ 1 - \left(\frac{3}{2\pi}\right) (\alpha - \beta) + \left(\frac{3}{4\pi}\right) [\sin(2\alpha + \pi/3) - \sin(2\beta - \pi/3)] \right\} + V_{Oc}^2 \left\{ \left(\frac{3}{2\pi}\right) (\alpha - \beta) + \left(\frac{3}{4\pi}\right) [\sin(2\beta - 2\lambda - \pi/3) - \sin(2\alpha - 2\lambda + \pi/3)] \right\}]^{1/2}$$

persamaan (53)

Bentuk gelombang tegangan terminal dapat diperoleh dengan melakukan plot menggunakan persamaan (49) pada Tabel 1, persamaan (50), dan persamaan (51) pada Tabel 2. Plot tersebut akan menghasilkan bentuk gelombang pada setengah periode dari tegangan terminal. Untuk

melakukan plot satu periode penuh perlu ditambahkan setengah periode berikutnya menggunakan nilai tegangan yang telah diperoleh tersebut setelah diberi tanda negatif terlebih dahulu.

Selanjutnya, Hamed & Chalmers (1990) memberikan penjelasan bahwa untuk memperoleh bentuk arus stator, dapat digunakan persamaan-persamaan seperti disajikan pada Tabel 3 dan Tabel 4 berikut ini.

Tabel 3. Persamaan Arus Stator Untuk $\gamma < \pi/3$

| Arus Fase | Persamaan | Selang Waktu |
|-------------------|--|---|
| $i_a(\omega t) =$ | $I_m \sin(\omega t - \phi) + A_1 e^{\rho \omega t}$ | $\alpha < \omega t < \beta + \pi/3$ |
| | $I_m \left[\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6} - \phi\right) + A_2 e^{\rho \omega t} \right]$ | $\beta + \pi/3 < \omega t < \alpha + \pi/3$ |
| | $I_m \sin(\omega t - \phi) + A_3 e^{\rho \omega t}$ | $\alpha + \pi/3 < \omega t < \beta + 2\pi/3$ |
| | $I_m \left[\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6} - \phi\right) + A_4 e^{\rho \omega t} \right]$ | $\beta + 2\pi/3 < \omega t < \alpha + 2\pi/3$ |
| | $I_m \sin(\omega t - \phi) + A_5 e^{\rho \omega t}$ | $\alpha + 2\pi/3 < \omega t < \beta + \pi$ |

persamaan (54)

Formula pendukung yang diperlukan untuk persamaan (54) adalah,

$$I_m = \frac{V_m}{Z_1}$$

$$Z_1 = \{R_s^2 + (\omega L)^2\}^{1/2}$$

$$\phi_1 = \tan^{-1}(\omega L/R_s)$$

$$\rho = -R_s/\omega L$$

$$A_1 = -\sin(\alpha - \phi) e^{-\rho \alpha}$$

$$A_2 = A_1 + 0,5 \sin(\beta - \phi) e^{-\rho(\beta + \frac{2\pi}{3})}$$

$$A_3 = A_2 - 0,5 \sin(\alpha - \phi) e^{-\rho(\alpha + \frac{2\pi}{3})}$$

$$A_4 = A_3 - 0,5 \sin(\beta - \phi) e^{-\rho(\beta + \frac{4\pi}{3})}$$

$$A_5 = A_4 - 0,5 \sin(\alpha - \phi) e^{-\rho(\alpha + \frac{4\pi}{3})}$$

persamaan (55)

Untuk mode $\gamma > \pi/3$, persamaan arus statornya dinyatakan dalam bentuk,

Tabel 4. Persamaan Arus Stator Untuk $\gamma > \pi/3$

| Arus Fase | Persamaan | Selang Waktu |
|-------------------|--|---|
| $i_a(\omega t) =$ | $\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_m [\sin(\omega t + \frac{\pi}{6} - \phi) + A_1 e^{\rho \omega t}]$ | $\alpha < \omega t < \beta + 2\pi/3$ |
| | $\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_m [\sin(\omega t - \frac{\pi}{6} - \phi) + A_2 e^{\rho \omega t}]$ | $\alpha + \pi/3 < \omega t < \beta + \pi$ |

persamaan (56)

dengan

$$\begin{aligned} A_1 &= -\sin(\alpha - \phi + \pi/6)e^{-\rho\alpha} \\ A_2 &= \sin(\alpha - \phi + \pi/6)e^{-\rho(\alpha+2\pi/3)} \end{aligned} \quad \text{persamaan (57)}$$

Dengan menerapkan kondisi-kondisi batas arus, hubungan antara α dan β untuk mode $\gamma < \pi/3$ dapat dinyatakan dalam,

$$\sin(\phi_1 - \beta) = K \cdot \sin(\alpha - \phi_1)e^{\rho(\beta-\alpha)} \quad \text{persamaan (58)}$$

dengan

$$K = \frac{2e^{\rho\pi} + e^{2\rho\pi/3} - e^{\rho\pi/3}}{e^{\rho\pi/3} + e^{2\rho\pi/3} + 2} \quad \text{persamaan (59)}$$

Sedangkan untuk mode $\gamma > \pi/3$, hubungan α dan β dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan seperti berikut ini.

$$\sin(\phi_1 - \beta + \pi/6) = \sin(\alpha - \phi_1 + \pi/6)e^{\rho(\frac{2\pi}{3}-\alpha+\beta)} \quad \text{persamaan (60)}$$

Dengan $\beta = \alpha - \gamma$, untuk mode $\gamma < \pi/3$ persamaan (58) dapat disusun dalam bentuk α sebagai variabel terikatnya sebagai berikut,

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\sin(\phi_1 + \gamma) + K \cdot \sin(\phi_1) e^{-\rho\gamma}}{\cos(\phi_1 + \gamma) + K \cdot \cos(\phi_1) e^{-\rho\gamma}} \right) \quad \text{persamaan (61)}$$

dan untuk kondisi $\gamma > \pi/3$, dengan sudut pemucuan sebagai variabel terikatnya, persamaan (60) dapat disusun kembali dalam bentuk,

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\sin(\gamma + \theta_1 + \pi/6) + \sin(\theta_1 - \pi/6) e^{-\rho(\gamma - \frac{2\pi}{3})}}{\cos(\gamma + \theta_1 + \pi/6) + \cos(\theta_1 - \pi/6) e^{-\rho(\gamma - \frac{2\pi}{3})}} \right)$$

persamaan (62)

Jika nilai γ dan nilai-nilai parameter motor diketahui, persamaan (61) dan persamaan (62) dapat digunakan secara langsung untuk menentukan besarnya sudut pemucuan α .

Berdasarkan diagram fasor pada Gambar (7), komponen fundamental dari tegangan terminal fase beban dapat dinyatakan dalam hubungan,

$$e_1 = C_1 E_m \sin(\omega t + \psi_1)$$

persamaan (63)

dengan

$$C_1 = (a_1^2 + b_1^2)^{1/2}$$

$$\psi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{a_1}{b_1} \right)$$

persamaan (64)

Parameter-parameter a_1 dan b_1 adalah nilai efektif dari koefisien Fourier fundamental dalam satuan per unit (pu). Pada mode $\gamma < \pi/3$ koefisien-koefisien tersebut diberikan oleh persamaan,

$$a_1 = \left(\frac{3}{4\pi} \right) \{ \cos(2\alpha) - \cos(2\beta) \}$$

$$b_1 = \left(\frac{3}{4\pi} \right) \{ \sin(2\alpha) - \sin(2\beta) + 2(\beta - \alpha) + \left(\frac{4\pi}{3} \right) \}$$

persamaan (65)

dan untuk mode $\gamma > \pi/3$ diberikan oleh,

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \left(\frac{3}{4\pi}\right) \left\{ \cos\left(2\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \cos\left(2\beta - \frac{\pi}{3}\right) \right\} \\
 b_1 &= \left(\frac{3}{4\pi}\right) \left\{ \sin\left(2\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \sin\left(2\beta - \frac{\pi}{3}\right) + 2(\beta - \alpha) + \left(\frac{4\pi}{3}\right) \right\}
 \end{aligned}$$

persamaan (66)

Sedangkan komponen fundamental dari arus stator diberikan oleh persamaan,

$$i_{a1} = I_{m1} \sin(\omega t - \psi) \quad \text{persamaan (67)}$$

dengan nilai maksimum dan sudut beda fasenya sebesar,

$$\begin{aligned}
 I_{m1} &= C_1 E_m / Z_1 \\
 \psi &= \phi_1 - \psi_1 = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R_s}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{a_1}{b_1}\right)
 \end{aligned}$$

persamaan (68)

Persamaan (67) memperlihatkan bahwa tegangan catu dalam bentuk ekivalen E mendahului arus stator fundamental dengan sudut fase sebesar ψ . Jika nilai-nilai beban diberikan, ψ merupakan fungsi dari koefisien a_1 dan a_2 atau merupakan juga fungsi dari α dan β .

Jika Gambar 5 (b) diperhatikan kembali, dan nilai RMS dari komponen fundamental tegangan terminal disimbolkan dengan E_1 , maka dapat ditulis hubungan,

$$\begin{aligned}
 E_1 &= I_{a1} \cdot Z_1 = C_1 \cdot E \\
 \frac{E}{I_{a1}} &= \frac{Z_1}{C_1}
 \end{aligned}$$

persamaan (69)

Penyelesaian bentuk gelombang tegangan dan arus stator di bawah kondisi pembebanan dapat dilakukan jika amplitudo dan fase dari tegangan E diketahui nilainya. Oleh sebab itu, perlu dilakukan terlebih dahulu identifikasi besaran-besaran tersebut. Berdasarkan diagram fasor pada Gambar (7), dapat ditulis hubungan-hubungan,

$$V_s^2 = E^2 + V_{OC}^2 + 2E \cdot V_{OC} \cos(\lambda) \quad \text{persamaan (70)}$$

dengan

$$\lambda = \psi - \phi \quad \text{persamaan (71)}$$

Substitusi persamaan (20) ke dalam persamaan (70) dihasilkan hubungan,

$$V_s^2 = E^2 + I_{a1}^2 C^2 + 2E \cdot I_{a1} C \cos(\lambda) \quad \text{persamaan (72)}$$

Dengan membagi bagian kanan dan kiri persamaan dengan I_{a1}^2 , dapat diperoleh,

$$\left(\frac{V_s}{I_{a1}}\right)^2 = C^2 + \left(\frac{E}{I_{a1}}\right)^2 + 2C \left(\frac{E}{I_{a1}}\right) \cos(\lambda) \quad \text{persamaan (73)}$$

Jika diberlakukan pemberian nama-nama $A = V_s/I_{a1}$ dan $B = E/I_{a1}$ maka persamaan (73) akan tampak menjadi lebih sederhana yakni,

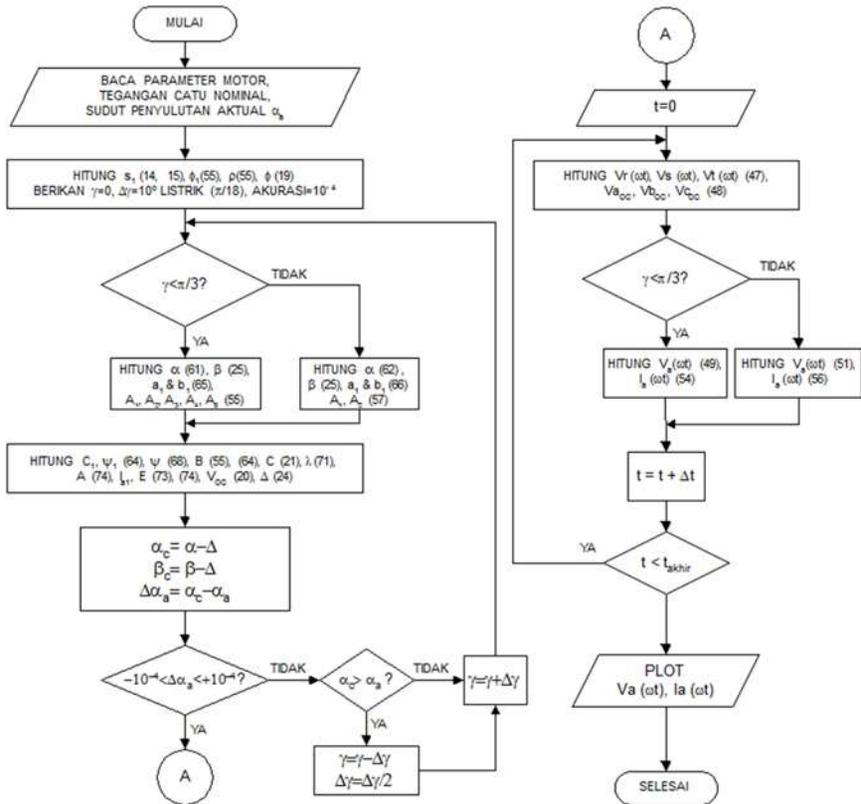
$$A^2 = B^2 + C^2 + 2BC \cos(\lambda) \quad \text{persamaan (74)}$$

Untuk keperluan komputasi, jika parameter motor, α dan β diketahui, maka nilai B, C dan γ dapat ditemukan menggunakan persamaan (14), persamaan (21), persamaan (69) dan persamaan (71). Jika nilai B, C dan γ dapat ditemukan, maka hasilnya dapat digunakan untuk menyelesaikan persamaan (74) untuk menemukan I_{a1} , V_{OC} dan E .

5. Prosedur Komputasi Bentuk Gelombang Tegangan dan Arus Motor

Berdasarkan persamaan-persamaan yang telah dikemukakan di atas, dapat disusun suatu prosedur komputasi untuk memperoleh visualiasi bentuk gelombang tegangan fase, tegangan eksitasi maupun arus stator untuk parameter motor tertentu seperti ditunjukkan pada Gambar 9. Komputasi secara langsung dengan menggunakan persamaan-persamaan yang ada dapat dilakukan jika variabel pengendali yang digunakan adalah sudut tak hantar *thyristor* (γ). Namun, jika diinginkan variabel pengendalinya sudut penyalaan *thyristor* (α), maka tidak terdapat penyelesaian langsung yang dapat dilakukan. Untuk mengatasi hal ini, komputasi dapat dilakukan dengan pendekatan iteratif menggunakan persamaan (58) sampai dengan persamaan (62) untuk berbagai nilai γ yang diberikan. Monograf ini menggunakan prosedur komputasi yang telah dibuat oleh Muchlas (1998: 60), dengan menetapkan α sebagai variabel pengendali dalam komputasi untuk memperoleh bentuk gelombang tegangan dan arus motor.

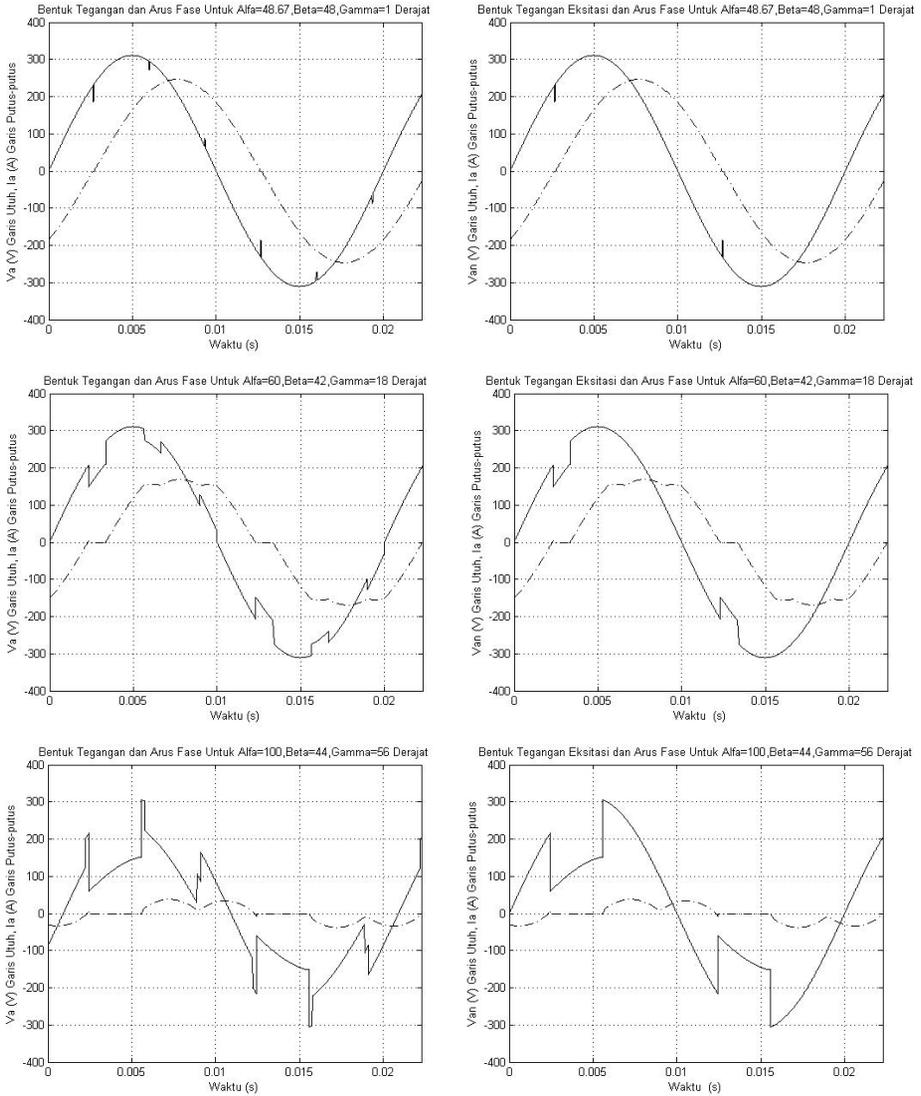
Mengacu pada saran Hamed & Chalmers (1990), pada awal iterasi perlu diberikan nilai $\gamma = 0$ dan $\Delta\gamma = 10^\circ$ listrik atau $\pi/18$. Selanjutnya dihitung nilai α aktual komputasi (α_c) dan hasilnya dikurangi dengan nilai α aktual yang diberikan (α_a). Jika selisih tersebut dalam jangkauan akurasi yang ditentukan, iterasi dihentikan dan proses dilanjutkan ke komputasi arus stator dan tegangan terminal. Namun, jika selisih tersebut di luar interval akurasi, proses dilanjutkan ke perhitungan nilai γ berikutnya, dan dalam hal ini nilai γ ditentukan oleh nilai selisih α_c dan α_a . Jika selisihnya positif, nilai γ dikurangi dengan $\Delta\gamma$ dan nilai $\Delta\gamma$ yang baru dibagi dengan dua, namun apabila selisih α_c dan α_a negatif, nilai γ yang baru ditambah dengan $\Delta\gamma$.



Gambar 9.

Diagram Alir Prosedur Komputasi Tegangan dan Arus Motor dengan α Sebagai Variabel Pengendali (Muchlas, 1998: 60)

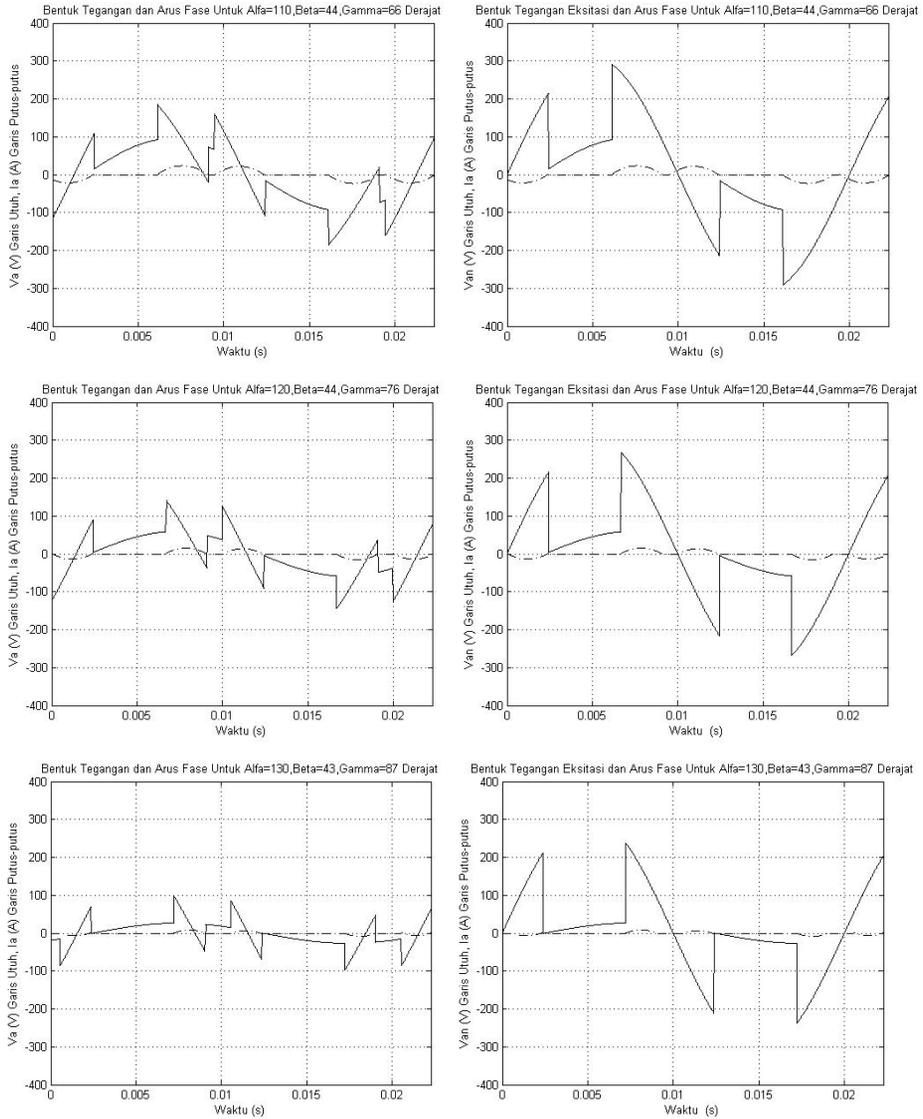
Untuk motor induksi tiga fase dengan parameter: tegangan nominal sumber 220 V, frekuensi tegangan sumber 50 Hz, $R_s = 0,01$ ohm, $R_r = 1,01$ ohm, $X_{ls} = 0,62$ ohm, $X_{lr} = 0,62$ ohm, dan $X_{ms} = 12,1$ ohm, simulasi menggunakan prosedur pada Gambar 9 menghasilkan bentuk gelombang arus dan tegangan motor mode $\gamma < \pi/3$ seperti pada Gambar 10 berikut ini.



Gambar 10.

Simulasi Menggunakan Prosedur Pada Gambar 9 Untuk Mode $\gamma < \pi/3$

Sedangkan untuk operasi motor pada mode $\gamma > \pi/3$ ditunjukkan pada gambar 11 berikut ini.

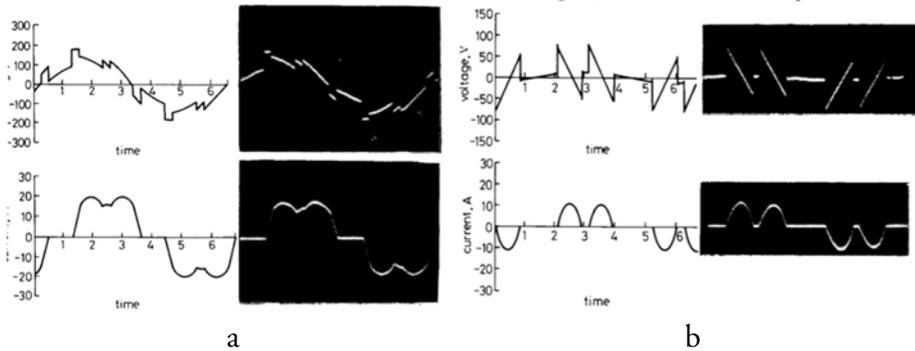


Gambar 11.

Simulasi Menggunakan Prosedur Pada Gambar 9 Untuk Mode $\gamma > \pi/3$

C. Validitas Analisis Bentuk Gelombang Tegangan dan Arus Motor

Analisis teoritik yang telah dilakukan di atas telah dilakukan validitasnya melalui uji banding antara hasil simulasi dengan eksperimen di laboratorium oleh Hamed dan Chalmers (1990: 190) seperti ditunjukkan pada Gambar 12 berikut ini.



Gambar 12.

Perbandingan Hasil Analisis Teoritik dan Eksperimen Bentuk Gelombang Tegangan dan Arus Pada Motor Induksi Tiga Fase
(Hamed dan Chalmers (1990: 190))

Berdasarkan hasil tersebut, Hamed dan Chalmers mengatakan bahwa terdapat bukti-bukti yang kuat adanya kesamaan bentuk gelombang hasil analisis melalui simulasi menggunakan persamaan-persamaan matematis dengan bentuk gelombang yang ditampilkan oleh motor induksi yang sesungguhnya melalui pengukuran di laboratorium dalam kondisi operasi yang sama dengan operasi-operasi yang diasumsikan pada analisis teoritik. Dengan demikian, dapat dinyatakan bahwa hasil analisis ini dapat digunakan sebagai referensi perbandingan yang valid untuk menguji kinerja sistem sejenis ditinjau dari bentuk gelombang arus dan tegangan yang dihasilkan. Monograf ini menggunakan hasil analisis teoritik di atas sebagai perbandingan untuk menilai kinerja sistem yang dikembangkan dengan kriteria: jika sistem dapat menghasilkan bentuk gelombang arus dan tegangan sesuai dengan hasil analisis teoritik tersebut, maka sistem dinyatakan telah dapat bekerja dengan baik.

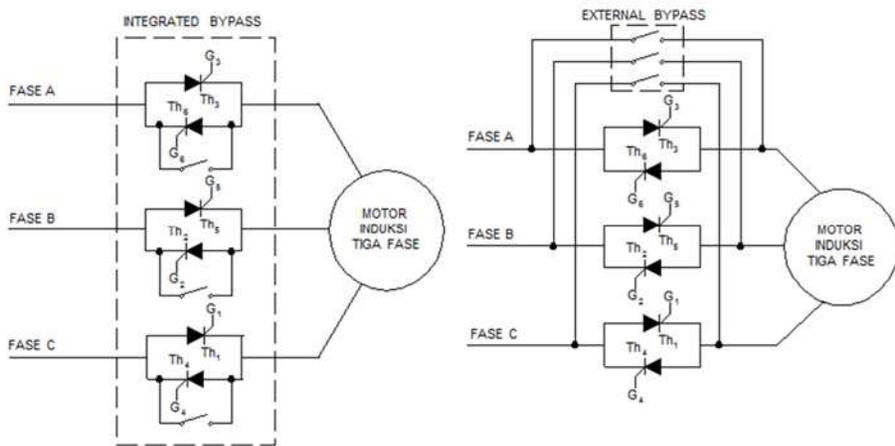
III | SISTEM KENDALI MOTOR INDUKSI BERKINERJA TINGGI

Sistem kendali motor induksi berkinerja tinggi yang dimaksud dalam monograf ini adalah sebuah gabungan piranti-piranti listrik dan elektronik yang dapat melakukan pengaturan tegangan catu untuk mereduksi lonjakan arus dan torsi saat mesin melakukan *start-up*. Selain itu, dalam keadaan *steady-state* sistem dapat memutus catu tegangan secara otomatis ketika torsi beban melebihi torsi maksimum yang dibangkitkan sehingga motor terhindar dari keadaan *stall*, yakni keadaan rotor berhenti berputar dengan tegangan masih terpasang pada ujung-ujung stator. Jika catu tegangan tidak segera diputus, keadaan *stall* dapat menimbulkan kerusakan belitan motor. Untuk mengatasi hal ini, sistem kendali perlu dilengkapi dengan pendeteksi torsi sehingga *power line* segera dapat diputus secara otomatis jika terdeteksi potensi munculnya *stall* yang ditunjukkan oleh naiknya torsi menuju ke nilai maksimum.

A. Sistem Kendali *Soft-Start*

Memperhatikan pengertian sistem kendali berkinerja tinggi yang dibatasi maknanya pada kemampuannya dalam mereduksi lonjakan *starting current* dan mendeteksi keadaan *overload*, terdapat dua sub sistem yang perlu dikembangkan yakni *soft-starter* dan *stall detector*. Menurut Mohan *et al.* (2003: 430-431), sistem pengendali *soft-starter* dapat diimplementasikan menggunakan rangkaian pengendali tegangan dengan *thyristor* terpicu yang disainnya seperti telah disajikan pada Gambar 3 (b) di atas. Sementara itu, menurut dua perusahaan ternama dalam bidang *Smart Motor Control* yakni Eaton Corporation (2013: 2) dan Rockwell Automation (2014: 3-7), desain *soft-starter* dapat menggunakan sistem pada Gambar 13.

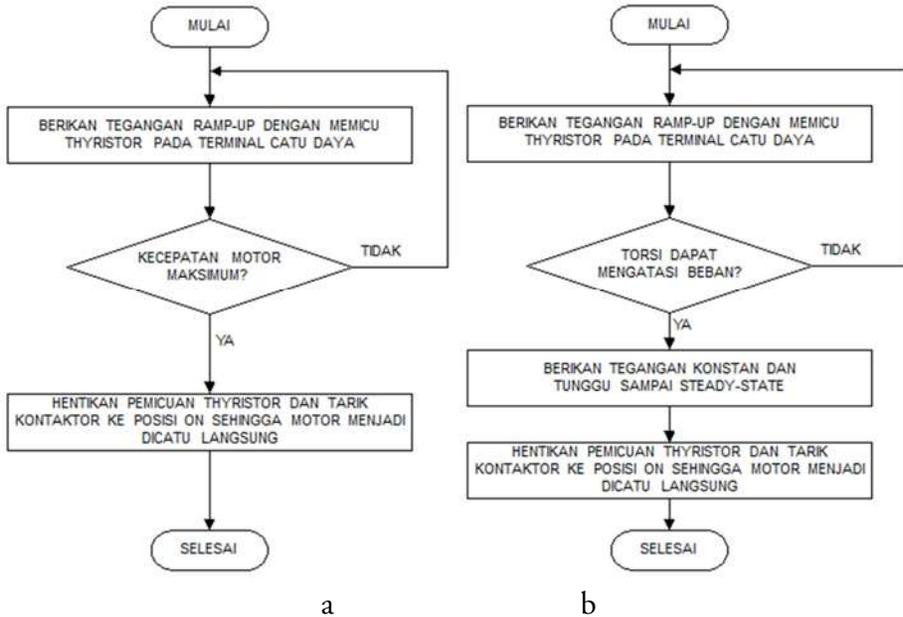
Mohan, *et al.* (2003) memberikan penjelasan bahwa prinsip *soft-starter* adalah mereduksi arus dan torsi awal dengan cara melakukan pengaturan sudut pemicuan *thyristor* untuk memberikan tegangan sekecil-kecilnya saat motor melakukan *start-up*, namun tegangan tersebut mampu membangkitkan torsi yang dibutuhkan untuk mengatasi beban. Melalui cara ini, seiring turunnya *slip* atau naiknya kecepatan motor, arus stator dapat direduksi karena tegangannya kecil, dan saat *steady-state* setiap fase diubah koneksinya menjadi *direct-on-line supplied*.



Gambar 13. Pengendali Tegangan Untuk *Soft-Starter* Versi *Eaton Corporation* dan *Rockwell Automation*

Pada sisi lain, perusahaan *Eaton Corporation* dan *Rockwell Automation* dalam publikasi yang diterbitkan untuk menyertai peluncuran produk-produknya, memberikan penjelasan bahwa reduksi *starting current* dan lonjakan torsi awal dapat dilakukan oleh *soft-starter* dengan memberikan tegangan dalam bentuk *ramp-up*, yakni tegangan yang nilainya berubah secara gradatif dari kecil sampai nilai tertentu. Pemberian tegangan ini dilakukan oleh pengendali dengan melakukan perubahan pemicuan *thyristor* setiap setengah periode tegangan inputnya, sehingga sudut pemicuannya berubah semakin kecil yang menghasilkan tegangan *ramp-up* semakin besar selama *start-up* berlangsung. Setelah kecepatan motor

maksimum tercapai, kontaktor *bypass* ditarik ON sehingga motor beroperasi menggunakan *direct-on-line supplied*, kondisi seperti ini menjadikan pekerjaan *thyristor* lebih efisien. Algoritma pengendalian *soft-start* dari Mohan, *et al.* (2003), Eaton Corporation (2013), dan Rockwell Automation (2014) secara skematik ditunjukkan pada Gambar 14 berikut ini.



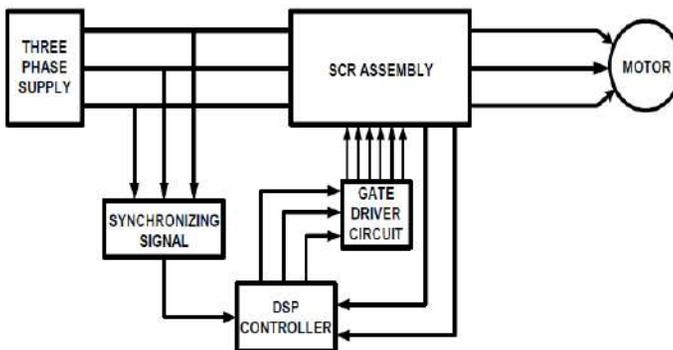
Gambar 14. Diagram Alir Algoritma *Soft-Start*:

- (a) Versi Eaton Corporation (2013) dan Rockwell Automation (2014),
 (b) Versi Mohan, *et al.* (2003)

Bukti-bukti bahwa unit *soft-starter* yang dibangun menggunakan *thyristor* sebagai pengendali tegangan memiliki kinerja yang baik dalam mereduksi arus *starting* saat motor induksi melakukan *start-up*, ditunjukkan oleh beberapa laporan berikut ini. Nithin, Jos & Rafeek (2013: 462-470), melaporkan bahwa *soft-starter* menggunakan pengendali tegangan dengan enam buah *thyristor* terpicu yang mereka buat, mampu mereduksi getaran torsi saat motor melakukan *start-up*. Pada tahun yang sama, Rafeek, *et al.* (2013: 210-213) juga melaporkan bahwa sistemnya yang merupakan model

matematis dari pengontrol tegangan dengan enam buah *thyristor* terpicu yang diverifikasi dengan model SIMULINK dari MATLAB, mampu mereduksi lonjakan arus saat mesin melakukan *start-up*. Dilaporkan pula bahwa pada tingkat simulatif, pengendali tegangan dengan *thyristor* terpicu oleh pulsa dengan *firing angle* gradual dari besar ke kecil, dapat mereduksi lonjakan arus dan torsi awal saat motor induksi tiga fase melakukan *start-up*.

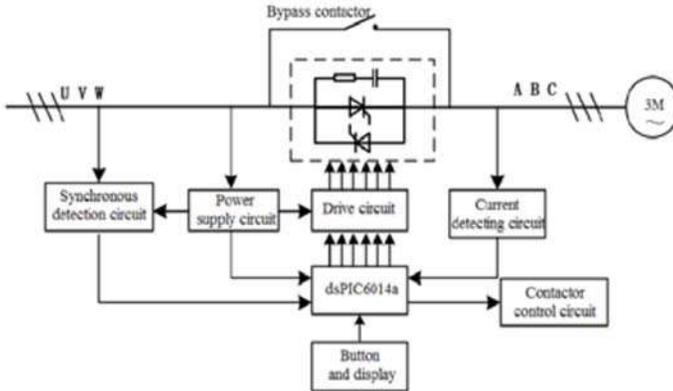
Laporan lain disampaikan oleh Ryu, Jeon & Shon (2016: 88-93). Riset mereka menghasilkan sebuah sistem kendali *soft-starter* yang dapat mereduksi arus *starting* yang tinggi pada motor induksi besar yakni *blower*, kipas angin, pompa dan peralatan *crain* seperti ditunjukkan pada Gambar 15. Rangkaian pemacu *thyristor* yang disematkan pada sistem telah dapat bekerja dengan baik dan dapat menghasilkan tegangan catu gradual naik sehingga motor dapat melakukan *start-up* dengan halus. Gambar 15 menunjukkan bahwa *soft-starter* motor induksi tiga fase dapat diimplementasikan menggunakan pengendali tegangan yang dilengkapi dengan pasangan *thyristor* anti paralel pada setiap fase tegangan inputnya.



Gambar 15. Rancangan *Soft-starter* dari Ryu, Jeon & Shon (2016: 90)

Relevan dengan laporan Ryu, Jeon & Shon (2016), Jun, Yao & Xia-hui (2016: 155) melaporkan bahwa mereka telah berhasil mengembangkan sebuah strategi pengendalian *soft-starter* dengan rangkaian seperti pada Gambar 16. Strategi pengendalian yang digunakan telah dapat memberikan

hasil menurunnya arus *starting* saat motor melakukan *start-up*. Terlihat bahwa disain pengendalnya menggunakan pasangan *thyristor back-to-back* atau anti paralel.



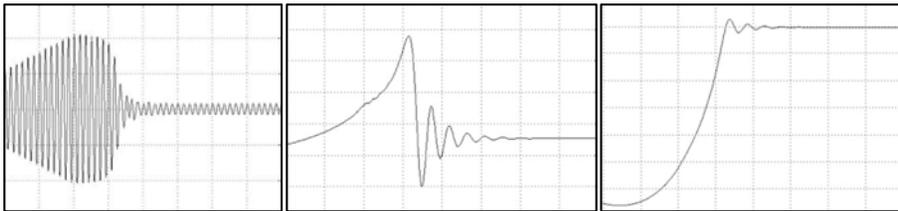
Gambar 16.

Desain Sistem Kendali *Soft-starter* dari Jun, Yao & Xia-hui (2016: 154)

Sementara itu, Trivedi, *et al.* (2017: 1635-1639) melaporkan juga bahwa risetnya telah berhasil menyimulasikan dengan SIMULINK rancangan *soft-starter* berbasis pengendali tegangan menggunakan *thyristor* terpicu. Hasil simulasinya menunjukkan bahwa dengan cara memberikan sudut picu secara graduatif pada *thyristor*, sistem menghasilkan tegangan yang bertambah secara graduatif pula sehingga memberikan efek *soft-starting* menurunkan arus awal dari 82 A menjadi 38 A pada motor induksi tiga fase.

Laporan-laporan yang telah disampaikan di atas telah menambah kuatnya pandangan bahwa *soft-starter* untuk motor induksi tiga fase dapat dibangun menggunakan pengendali tegangan oleh *thyristor* dengan konfigurasi anti paralel sebagai komponen utamanya. Sedangkan dari aspek prosedurnya, semua laporan tersebut mengindikasikan bahwa penurunan arus *starting* dapat direduksi oleh *soft-starter* dengan cara memberikan tegangan catu dalam bentuk *ramp-up* yang dilakukan dengan memberikan sudut pemicuan awal tinggi, dan secara graduatif digeser ke sudut pemicuan yang rendah hingga torsi elektromagnetik mampu mengatasi beban.

Ditinjau dari bentuk gelombang arus, torsi elektromagnetik dan kecepatan rotor yang ditampilkan oleh motor dengan sistem kendali *soft-start*, laporan-laporan dari Nithin, Jos & Rafeek (2013), Rafeek, *et al.* (2013), Jun, Yao & Xia-hui (2016), Muchlas (2016), dan Trivedi, *et al.* (2017) menunjukkan hasil yang sama seperti ditunjukkan pada Gambar 17.



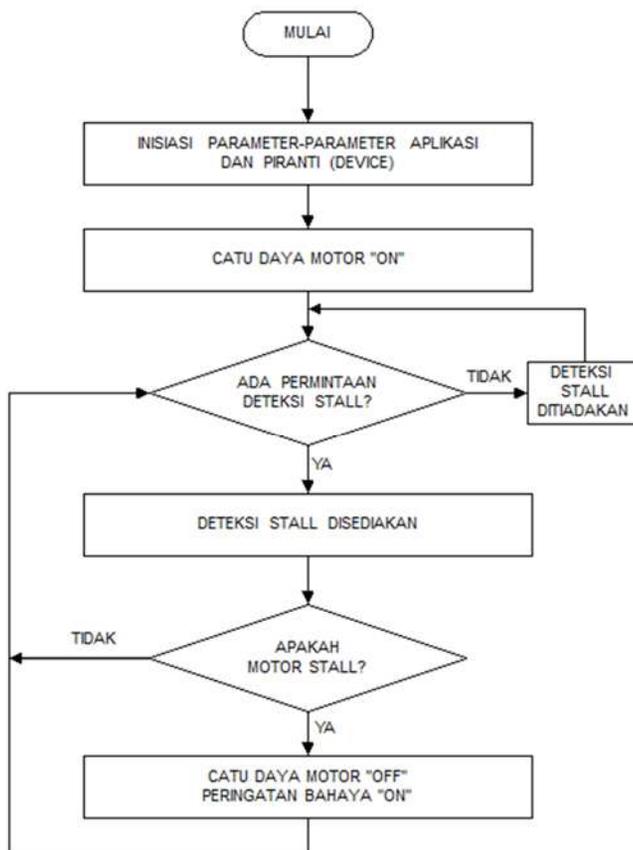
Gambar 17. Bentuk Gelombang Hasil Penelitian Terdahulu Pada Sistem Kendali *Soft-start*. Dari Kiri ke Kanan: Karakteristik Arus, Torsi dan Kecepatan Putar Dalam Fungsi Waktu

Oleh karena bentuk gelombang arus, torsi dan kecepatan motor pada Gambar 17 telah terverifikasi melalui berbagai laporan penelitian yang pernah ada, maka ketiganya dapat digunakan sebagai rujukan untuk menilai kinerja sistem kendali *soft-start* dari aspek bentuk gelombang yang ditampilkannya. Dengan kata lain, bentuk gelombang pada Gambar 17 dapat digunakan sebagai kriteria untuk menilai validitas sebuah sistem kendali *soft start* motor induksi tiga fase yang dibangun dengan pengendali tegangan menggunakan *thyristor* sebagai komponen utamanya.

B. Sistem Kendali Deteksi *Stall*

Sistem kendali deteksi *stall* digunakan untuk mendeteksi munculnya keadaan *stall*, yakni motor dalam keadaan berhenti berputar karena bebannya berlebihan namun tegangan catu masih terpasang. Jika pada keadaan ini catu tegangan tidak segera dimatikan, kondisi *stall* dapat menyebabkan kerusakan pada belitan motor. Agar motor tetap aman, sistem kendalinya perlu dilengkapi dengan pendeteksi keadaan *stall* yang akan mendeteksi situasi *overloaded* dan unit *breaker* yang akan melakukan

langkah-langkah cepat dalam memutuskan catu daya ketika motor kelebihan beban. Penjelasan tentang prinsip kerja detektor *stall* dapat ditemukan pada dokumen-dokumen yang dipublikasikan oleh perusahaan-perusahaan yang bergerak dalam bidang pengendalian motor cerdas. Menurut dokumen *Application Note AN2149* dari perusahaan *Freescale Semiconductor*, dijelaskan bahwa prinsip sistem kendali deteksi *stall* dapat digambarkan seperti pada diagram alir yang disajikan melalui Gambar 18 berikut ini (Mackay, 2004: 8-9).

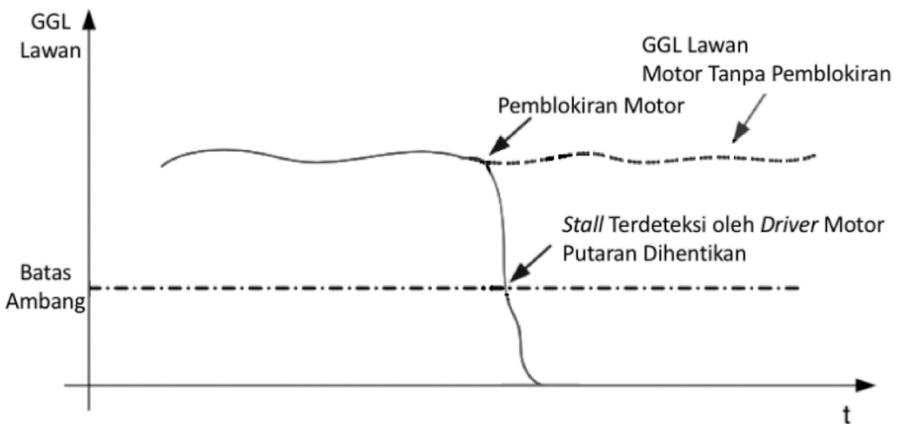


Gambar 18. Diagram Alir Sistem Kendali Deteksi *Stall* pada Motor Listrik dari *Freescale Semiconductor, Inc.* (Mackay, 2004)

Berdasarkan Gambar 18 dapat diperoleh penjelasan bahwa pada sistem kendali deteksi *stall*, mula-mula dilakukan inisiasi parameter-parameter

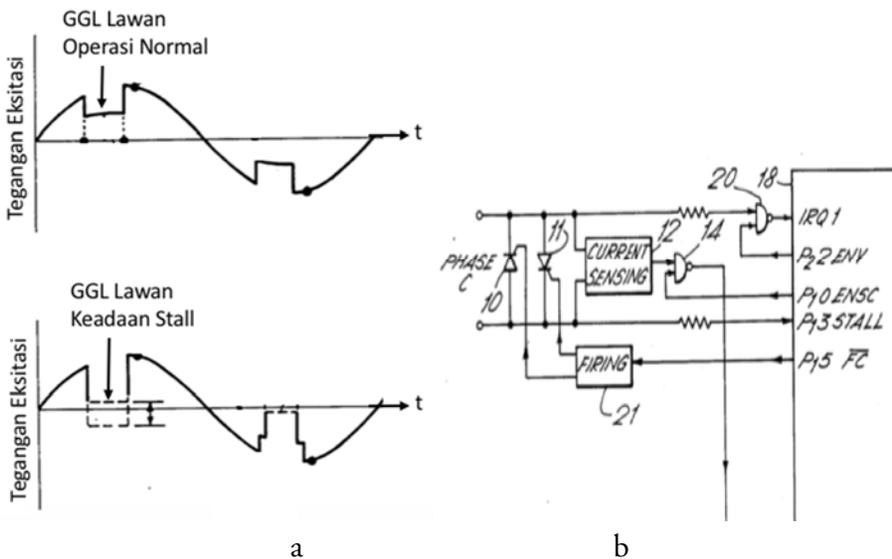
aplikasi, diteruskan dengan pemberian catu daya motor dan pengaktifan detektor. Jika terdeteksi adanya situasi *stall*, maka sistem kendali akan mematikan catu daya dan menghidupkan tanda peringatan bahaya. Sementara itu, dari dokumen *Application Note AN2650* yang diterbitkan oleh perusahaan *ST Microelectronics*, diperoleh informasi bahwa deteksi *stall* dapat dilakukan dengan menggunakan metode GGL Lawan. Pada motor yang mengalami *stall*, oleh karena rotor berhenti berputar maka belitannya tidak menimbulkan GGL Lawan. Ketiadaan GGL Lawan ini yang ditunjukkan oleh meningkatnya arus motor dapat digunakan sebagai indikator keadaan *stall*. Prinsip pendeteksian *stall* dilakukan dengan mendeteksi kenaikan arus motor yang terjadi selama mesin *running*, dan jika kenaikan arus mencapai batas ambang yang menunjukkan tidak adanya GGL Lawan, maka dianggap terjadi keadaan *stall*, selanjutnya dilakukan pemutusan terhadap arus fase yang mencatu motor (STMicroelectronics, 2013: 10).

Penggunaan GGL Lawan sebagai metode pendeteksian keadaan *stall* juga digunakan oleh perusahaan kontrol mesin listrik cerdas *ON Semiconductor*, yang penjelasannya disajikan melalui Gambar 19 berikut ini.



Gambar 19. Prinsip Pendeteksian *Stall* Menggunakan GGL Lawan (ON-Semiconductor, 2015: 5)

Metode pendeteksian *stall* pada Gambar 19 di atas menggunakan nilai batas ambang sebagai parameter pengendalian. Batas ambang merupakan nilai GGL Lawan yang dianggap menjadikan motor mengalami keadaan *stall*. Ketika terjadi pemblokiran pada motor, kecepatan putar rotor akan menurun secara drastis menyebabkan GGL Lawan juga menurun dan jika nilainya sampai pada batas ambang, pengendali akan menghentikan putaran motor dengan memutus arus catu daya. Pendeteksian GGL Lawan itu sendiri dapat dilakukan dengan berbagai metode, dan menurut Unsworth (1988: 9-17) pemegang *patent* Amerika Serikat nomor 4767975, GGL Lawan yang berhubungan dengan keadaan *stall*, dapat diperkirakan nilainya saat mencapai batas ambang dengan menggunakan prinsip seperti ditunjukkan pada Gambar 20 berikut ini.



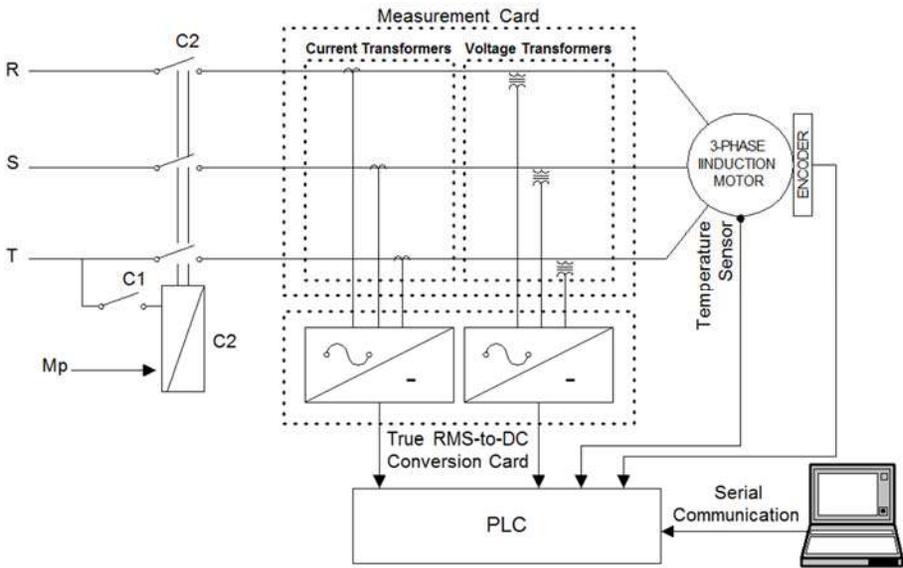
Gambar 20. Metode Deteksi *Stall* dari Unsworth (1988: 9-17):

- (a) Keadaan GGL Lawan,
- (b) Rancangan *Hardware*

Merujuk pada Gambar 20 (a) atas, terlihat bahwa GGL Lawan sebelum terjadinya *stall* bernilai positif di atas garis *base line* nol, sedangkan pada Gambar 20 (a) bawah menunjukkan keadaan pada saat terjadinya *stall*,

dalam hal ini GGL Lawan bernilai mendekati 0 sampai dengan di bawah nol. Gambar 20 (b) adalah rancangan perangkat keras untuk mengimplementasikan pendeteksian *stall* berdasar GGL Lawan yang dibangkitkan motor. Sensor arus digunakan untuk mendeteksi keadaan GGL Lawan dan jika terdeteksi nilainya bersesuaian dengan keadaan GGL Lawan di sekitar *base line* nol, maka unit *sensing current* akan mengirim sinyal *stall* ke mikrokontroler. Mekanisme deteksi seperti ini dilakukan oleh unit *current sensing* untuk setiap fase tegangan catu motor. Rancangan *hardware* dari *patent* tersebut telah menunjukkan bahwa pendeteksian keadaan *stall* dapat dilakukan dengan mendeteksi GGL Lawan menggunakan sensor arus saat nilainya mencapai batas ambang di sekitar nol.

Salah satu desain detektor *stall* pernah dikembangkan oleh para peneliti dari Universitas Pane India. Borse, Pandhare & Kumar (2015: 893-897) telah mendesain sebuah sistem proteksi pada motor induksi tiga fase dengan menggunakan basis PLC seperti ditunjukkan pada Gambar 21. Mereka menemukan bahwa desain yang diajukan telah dapat bekerja dengan baik, dalam arti tidak hanya dapat mereduksi *starting current* saja saat motor melakukan *start-up*, namun sistem mampu membangkitkan torsi internal awal besar yang mampu mengatasi beban. Sistem yang dikembangkan juga telah mampu memonitor arus lebih, tegangan lebih, suhu lebih, kecepatan lebih, lonjakan dan vibrasi arus serta dapat mengatasi kesalahan-kesalahan yang terjadi selama operasi motor berlangsung.

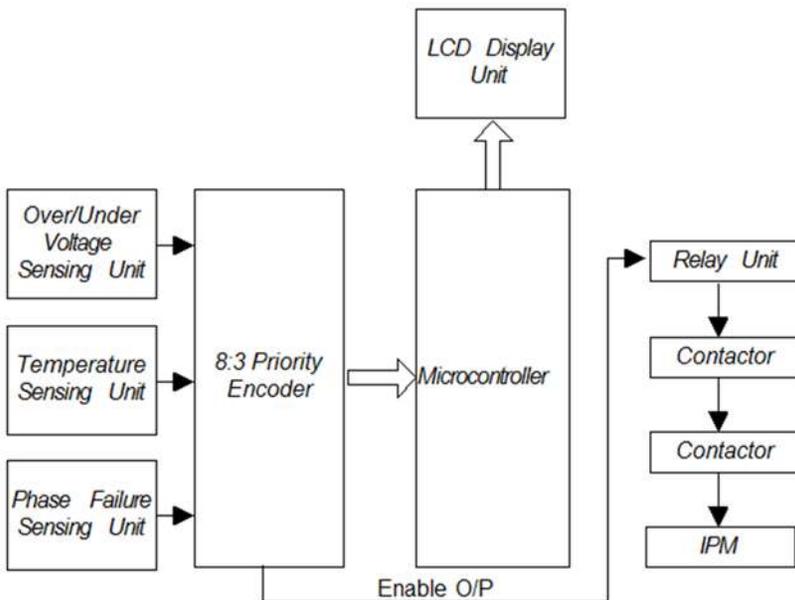


Gambar 21. Sistem Proteksi Motor Induksi
(Borse, Pandhare & Kumar, 2015: 894)

Merujuk Gambar 21 di atas, terlihat bahwa sistem proteksi dapat diimplementasikan dengan memasang unit pengukuran arus dan unit pengukuran tegangan. Dengan menghubungkan unit pengukuran tersebut ke bagian prosesor (dalam hal ini PLC), dapat dijalankan sebuah prosedur atau algoritma pengendalian untuk melindungi motor induksi. Dalam konteks pengembangan sistem proteksi motor dari keadaan *stall*, desain para peneliti dari India ini memberikan inspirasi jika kondisi *stall* dapat diwakili oleh naiknya arus sampai batas ambang tertentu, maka pendeteksiannya dapat dilakukan dengan memasang unit trafo arus pada jalur fase tegangan input. Selanjutnya, jika arus yang terdeteksi oleh sensor arus telah mencapai batas ambang yang telah ditentukan, sistem dapat menggerakkan *relay driver* untuk memutus catu daya motor pada setiap fasenya, seperti ditunjukkan desain perangkat kerasnya pada Gambar 21 di atas.

Desain pendeteksi *stall* yang lain untuk motor induksi tiga fase pernah dibuat oleh Singh, *et al.* (2017: 714-716). Mereka mengembangkan sistem proteksi motor induksi tiga fase terhadap pengaruh fenomena *single phasing*,

tegangan lebih (*over voltage*), tegangan kurang (*under voltage*), dan suhu lebih (*over temperature*). Selanjutnya dilaporkan bahwa sistem yang dibangun berbasis mikrokontroler tersebut, telah dapat diimplementasikan di beberapa industri yang membutuhkan operasi motor induksi tiga fase. Sistem yang desainnya ditunjukkan pada Gambar 22 di bawah ini, dalam operasinya dapat melindungi motor dari kondisi-kondisi *fault* dengan desain sederhana, reliabel, serbaguna, murah serta cepat responnya.



Gambar 22. Desain *Fault Protector* dari Singh, *et al.* (2017: 715)

Sekalipun tidak secara eksplisit menyebut terdapat unit *stall detector* dalam sistem yang dibangun, namun desain perangkatnya dapat digunakan sebagai referensi gagasan untuk mengembangkan metode proteksi motor terhadap pengaruh *stall*. Berdasarkan Gambar 22, terlihat bahwa deteksi kesalahan pada motor dapat dilakukan dengan memasang unit sensor kesalahan fase. Unit sensor ini dalam beberapa rancangan dari perusahaan sistem kontrol motor cerdas sering digunakan sebagai pendeteksi keadaan *stall* dengan metode GGL Lawan melalui pendeteksian beda fase seperti pada cara yang dikembangkan oleh perusahaan ON-Semiconductor (2015:7).

Karena telah terbukti dapat menjadi bagian dari sistem proteksi motor yang efektif, unit sensor beda fase dapat digunakan sebagai salah satu bagian dari *stall detector* dengan metode GGL Lawan.

Pada Gambar 22 di atas, juga ditunjukkan adanya sensor tegangan lebih untuk mendeteksi adanya tegangan fase yang berlebihan. Gagasan yang dapat dikembangkan dari adanya sensor tersebut adalah, jika besaran yang dikeluarkan oleh sensor dapat dikonversi ke dalam satuan arus listrik dan diberikan nilai batas ambangnya, maka unit ini dapat digunakan sebagai pendeteksi adanya arus lebih saat terjadinya *stall*. Jadi, pendeteksi *stall* dapat dikembangkan dari sensor tegangan lebih yang telah terbukti dapat menjadi bagian dari sistem proteksi motor induksi.

IV | SIMULATOR SEBAGAI MEDIA PEMBELAJARAN

Perkembangan teknologi informasi yang sangat pesat telah mempengaruhi semua aspek dalam bidang pendidikan. Salah satu aspek yang terpengaruh secara signifikan oleh perkembangan teknologi informasi adalah bidang media pembelajaran. Pengaruh teknologi tersebut telah mempermudah tidak hanya dalam hal penggunaannya saja, namun juga sampai pada proses penyediaan dan pengembangan semua perangkat pendidikan termasuk media pembelajaran. Pada era sebelum teknologi informasi berkembang, guru/dosen mengalami kesulitan dalam menyediakan media yang dapat menirukan fenomena-fenomena tertentu yang diperlukan dalam sebuah proses pembelajaran. Saat ini, dengan bantuan teknologi informasi guru/dosen dapat dengan mudah membangun sendiri simulator sebagai media yang dapat menyimulasikan atau menirukan kejadian-kejadian rumit untuk dibawa ke dalam kelas atau laboratorium. Bahkan, pengaruhnya telah menggeser orientasi kegiatan laboratorium yang semula berbasis pada kegiatan *hands-on*, saat ini banyak desain kegiatan praktik bergeser ke kegiatan simulatif berbasis teknologi informasi. Memperhatikan kondisi tersebut, sistem kendali motor induksi berkinerja tinggi dalam monograf ini dibangun dengan melibatkan teknologi informasi yang menghasilkan perangkat pembelajaran berbentuk simulator berbasis perangkat lunak SIMULINK dari Matlab yang dapat menirukan watak motor induksi yang dikendalikan oleh unit *soft-starter* dan *stall-detector*.

A. Definisi Simulator

Penggunaan simulator sebagai media dalam proses pembelajaran menjadi penting untuk diperhatikan oleh guru/dosen, mengingat perangkat

pembelajaran ini dapat memberikan manfaat sebagai alat yang dapat menirukan kejadian yang mirip dengan keadaan sesungguhnya (Babich & Mavrommatis, 2004: 1044). Selain itu, simulator juga memiliki manfaat: (1) meningkatkan keamanan kerja bagi siswa/mahasiswa yang bekerja dengan alat dan bahan-bahan berbahaya, (2) memberikan tingkat fleksibilitas yang tinggi pada proses pembelajaran karena dapat digunakan untuk mendukung pembelajaran *e-learning* di sembarang tempat dan waktu; (3) meningkatkan efisiensi pendanaan; (4) menciptakan situasi kerja kolaborasi (Shokri & Faraahi, 2010: 1357); (5) menyediakan pengalaman yang sulit diperoleh pada dunia real; (6) mengubah fenomena langka menjadi peristiwa biasa sehingga lebih mudah dipelajari; dan (7) menyederhanakan situasi belajar yang kompleks (Alessi & Trollip, 2001: 226-231).

Definisi simulator itu sendiri mengalami rumusan yang sangat dinamis sesuai dengan perkembangan teknologi yang mempengaruhinya. Pada masa sekarang ketika teknologi informasi telah berkembang dengan pesat, simulator didefinisikan sebagai salah satu objek multimedia interaktif dua dimensi atau tiga dimensi yang berupa objek-objek kompleks dalam bentuk digital yang tersusun dari format heterogen, terdiri atas teks, *hypertext*, suara, gambar, animasi, video dan grafik yang mengandung tujuan pembelajaran eksplisit maupun implisit (Budhu, 2002: 2). Sementara itu, Babich & Mavrommatis (2004: 1044) mendefinisikan simulator sebagai perangkat lunak yang dapat menirukan atau menyimulasikan watak peralatan-peralatan fisis atau sistem real, dan Shokri & Faraahi (2010: 1357) memberikan pengertian simulator sebagai lingkungan simulasi yang menyediakan fasilitas latihan dan percobaan di kelas maupun eksperimen secara virtual di laboratorium.

Berdasarkan berbagai definisi yang telah dikemukakan tersebut, dapat diambil pengertian bahwa simulator dapat disebut sebagai gabungan perangkat keras dan perangkat lunak berbentuk multimedia interaktif mengandung objek-objek digital berupa teks, *hypertext*, suara, gambar, animasi, maupun video yang dapat menirukan fenomena fisis dua atau tiga

dimensi dan dapat digunakan sebagai media pembelajaran di kelas atau eksperimen di laboratorium. Jadi, atas dasar definisi yang telah dikemukakan tersebut dapat dikemukakan bahwa simulator memiliki spesifikasi seperti ditunjukkan pada Tabel 5 berikut ini.

Tabel 5. Spesifikasi Simulator Berdasarkan Definisi

| Nomor | Aspek | Spesifikasi |
|-------|--------|--|
| 1 | Bentuk | a. <i>Hardware</i> b. <i>Software</i> c. Multimedia mengandung teks, <i>hypertext</i> , suara, gambar, animasi, atau video |
| 2 | Sifat | a. Interaktif b. Dapat menirukan fenomena fisis dua/tiga dimensi |
| 3 | Fungsi | a. Media Pembelajaran di Kelas b. Media Praktik di Laboratorium |

B. Jenis Simulator

Secara umum, simulator diklasifikasikan ke dalam empat kategori yakni fisik, iteratif, prosedural dan situasional (Alessi & Trollip, 2001: 214). Simulator fisik merupakan media yang menggambarkan objek/gejala fisik pada suatu layar yang sifatnya statis, dalam hal ini pengguna tidak dapat berinteraksi dalam dua arah melainkan hanya satu arah saja. Contoh simulasi fisik pada bidang teknik adalah transmisi listrik lewat jaringan berdaya tinggi yang hanya menunjukkan gejalanya saja tanpa memberi kesempatan kepada penggunanya untuk berinteraksi.

Berbeda dengan simulator fisik yang bersifat statis, simulator iteratif bersifat dinamis memungkinkan penggunanya melakukan simulasi gejala fisik dengan menggunakan parameter yang bervariasi. Setiap parameter yang diberikan, simulator melakukan simulasi terhadap suatu gejala fisik, dan simulasi akan diulang untuk parameter yang lain. Simulator iteratif digunakan untuk mempelajari proses-proses yang tidak mudah diamati seperti gravitasi bumi pada ilmu fisika dan karakteristik mesin-mesin listrik pada bidang teknik elektro.

Simulator prosedural merupakan sekumpulan perangkat yang digunakan untuk menampilkan urutan proses atau aksi dalam mencapai suatu tujuan. Dalam simulasi prosedural dibutuhkan juga objek-objek atau gejala-gejala yang bersifat fisik, seperti pada simulasi fisik, yang akan menampilkan urutan aksi yang berlangsung di dalamnya. Contoh simulasi prosedural adalah *flight simulator* untuk mempelajari pengendalian pesawat terbang oleh pilot, simulasi diagnosis terhadap alat-alat yang tidak berfungsi, dan simulasi diagnosis medis dalam bidang kedokteran.

Sementara itu, simulator situasional menunjukkan suatu perilaku dan sikap orang atau organisasi dalam situasi-situasi yang berbeda. Simulator yang ada di dalam monograf ini merupakan gabungan jenis fisik dan iteratif karena dalam pengoperasiannya menyediakan tampilan untuk menirukan watak sistem fisis *real* yakni motor induksi tiga fase berdasarkan pengaturan parameter-parameter simulasi yang diberikan oleh penggunanya.

C. Kelayakan Simulator Sebagai Media Pembelajaran

Lulusan program akademik maupun vokasi bidang teknik elektro dituntut memiliki bekal keterampilan teknis yang baik sesuai bidang ilmunya agar peluang dalam mengakses dunia kerja semakin besar. Salah satu sarana yang dapat digunakan untuk melatih keterampilan teknis adalah melalui kegiatan praktik di laboratorium atau praktik-praktik sejenis yang diintegrasikan dalam proses pembelajaran. Untuk itu, diperlukan dukungan sarana laboratorium yang memadai agar dapat mencapai hasil yang efektif. Tuntutan tersebut tidak mudah dipenuhi, mengingat kegiatan praktik yang sifatnya *hands-on* untuk mendukung pembelajaran sistem kendali motor berkinerja tinggi selain memerlukan alat-alat dengan biaya besar, juga pelaksanaannya tidak fleksibel, cenderung kurang menarik dan tidak memotivasi pesertanya. Memperhatikan situasi tersebut, perlu dikembangkan simulator sistem kendali motor berkinerja tinggi sebagai alternatif perangkat praktik selain *hands-on*. Melalui penggunaan simulator ini diharapkan pembelajaran menjadi lebih efektif, efisien, fleksibel,

manarik, memotivasi, meningkatkan pengetahuan dan keterampilan teknis serta dapat membekali mahasiswa secara baik tentang dasar-dasar pengendalian sistem sehingga memperlancar penyelesaian studi.

Penggunaan perangkat pembelajaran dalam bentuk simulator, berdasarkan beberapa kajian, dapat memberikan peningkatan pencapaian belajar mahasiswa dan persepsi yang positif bagi dosen maupun mahasiswa. Colace *et al.* (2004: 22-24) telah menggunakan simulator sebagai perangkat pembelajaran untuk mendukung praktik bagi 100 mahasiswa pada pelajaran Pengukuran Listrik dan Elektronika, dan hasilnya menunjukkan adanya peningkatan pencapaian belajar yang lebih baik pada mahasiswa. Penelitian tersebut juga menemukan bahwa penggunaan simulator sebagai perangkat pembelajaran praktik memberikan tingkat kepuasan yang tinggi dan persepsi yang positif terhadap penggunaan instrumen dan bahan-bahan praktik virtual yang disediakan media.

Lang *et al.* (2004: 1-12) telah mengujicoba penggunaan simulator pada mahasiswa jurusan Teknik Elektro Universitas Bordeaux Perancis sebanyak 84 orang, dan hasilnya sangat menakjubkan karena semua peserta merasa bergairah dalam mengikuti praktik menggunakan simulator. Lebih dari itu, perangkat pembelajaran tersebut telah mampu meningkatkan hasil belajar mahasiswa dibandingkan jika menggunakan peralatan-peralatan real. Sementara itu, penggunaan simulator yang dipadu dengan pembelajaran *online* menggunakan *web* telah memberikan sebuah alternatif pembelajaran yang sangat fleksibel dari sisi ruang dan waktu (Lin & Lin, 2005: 295-296). Selain pada aspek kognitif, simulator juga telah mampu meningkatkan mahasiswa pada ranah psikomotorik terutama keterampilan orde tinggi dan orde rendah (Tzafestas *et al.*, 2006: 360-369). Penggunaan simulator sebagai perangkat pembelajaran yang efektif juga telah dibuktikan Wolf (2010: 216-222) yang menemukan bahwa belajar menggunakan media simulatif hasilnya tidak berbeda dengan belajar di kelas bersama guru yang baik, keduanya memberikan efektivitas yang sama. Bahkan tidak hanya efektif sebagai perangkat pembelajaran, Goodwin, *et al.* (2011: 48-55) menemukan bahwa simulator mampu memberikan opini yang sangat

positif di kalangan mahasiswa terhadap relevansinya dengan realitas dunia industri.

Beberapa kajian terbaru juga telah dilakukan terkait peranan simulator dalam pembelajaran teknik elektro. Penggunaan alat-alat virtual dalam bentuk simulator telah dapat meningkatkan nilai pos tes terhadap nilai pre tes mahasiswa yang mengikuti praktik tentang sifat-sifat bahan magnetik sebagai pra syarat belajar teori mesin-mesin listrik, dan telah memberikan opini positif pada aspek relevansi, kegunaan, dan motivasi (Martinez-Roman *et al.*, 2015: 159). Memadukan simulator dalam bentuk *virtual reality* ke dalam kelas untuk tujuan visualisasi dan latihan pengoperasian alat-alat listrik telah menjadikan pembelajaran lebih menarik, memotivasi dan lebih jelas terutama pada materi-materi yang terkait dengan transformator daya listrik (Barata, Filho & Nunes, 2015: 260). Pengembangan perangkat pembelajaran terkait materi sistem proteksi daya listrik pernah dilakukan oleh Shahnia, Moghbel & Yengejeh (2016: 89) dari Universitas *Curtin*, yang menemukan bahwa menggabungkan penggunaan simulator berbasis komputer dan aktivitas berbasis praktik dalam sebuah proses pembelajaran dapat meningkatkan motivasi belajar, menjadikan kuliah sistem proteksi daya menjadi lebih menarik, dan meningkatkan pemahaman mahasiswa. Melalui penelitian tersebut juga ditemukan bahwa sebagian besar mahasiswa dapat mencapai hasil belajar yang baik. Khan, *et al.* (2017: 254) melalui penelitiannya telah menemukan bahwa perangkat pembelajaran yang dikembangkan dalam bentuk simulator berbasis program MATLAB dapat membantu mahasiswa dalam memahami konsep sistem kontrol. Muchlas (2018: 66) melaporkan bahwa simulator motor induksi berbasis SIMULINK yang digabung dengan pembelajaran *online* menggunakan piranti *mobile*, telah dapat menghasilkan sebuah media yang fleksibel, membangkitkan minat dan motivasi, memperkuat pengetahuan, mudah digunakan dan lebih baik dibandingkan menggunakan peralatan real.

Temuan-temuan di muka juga telah menunjukkan bahwa materi-materi kuliah bidang teknik elektro, termasuk sistem kendali motor berkinerja

tinggi, layak untuk disediakan simulatornya. Pentingnya penyediaan simulator ini dilandasi oleh kenyataan bahwa penggunaannya telah dapat meningkatkan efektivitas, efisiensi dan fleksibilitas, serta memberikan opini positif dosen dan mahasiswa pada aspek motivasi, kegunaan, dan relevansi, dalam mendukung proses pembelajaran yang *compatible* dengan mesin-mesin listrik, seperti: (1) watak bahan magnetik (Martinez-Roman *et al.*, 2015: 159); (2) trafo daya listrik (Barata, Filho & Nunes, 2015: 260); (3) proteksi daya listrik (Shahnia, Moghbel & Yengejeh, 2016: 89); dan konsep sistem kendali (Khan, *et al.*, 2017: 254)

D. Implementasi Perangkat Pembelajaran Sistem Kendali Motor Listrik Berkinerja Tinggi

Berdasarkan kajian pustaka yang telah dibahas di muka, perangkat pembelajaran dalam bentuk sistem kendali mesin berkinerja tinggi yang di dalamnya terkandung unit *soft-starter*, *stall detector* dan *breaker*, dapat disusun menggunakan model pengendali tegangan dengan *thyristor* sebagai komponen utama *switching*. Untuk motor induksi tiga fase, jumlah *thyristor* yang digunakan sebanyak enam buah membentuk konfigurasi pasangan anti paralel atau *back-to-back* pada setiap fase tegangan catu. Agar dapat membentuk fungsi pengendali tegangan, pemicuan *thyristor* dilakukan oleh sebuah rangkaian pemicuan (*firing circuit*) yang dapat membangkitkan enam buah pulsa tersinkronisasi.

Merujuk kajian pustaka juga diperoleh informasi bahwa unit *soft-starter* dapat diimplementasikan menggunakan sistem kendali tegangan berbasis *thyristor* dengan menambahkan rangkaian pendeteksi keadaan nol (*zero cross detector*) sebagai referensi pemicuan oleh *firing circuit* dan rangkaian pendeteksi torsi maksimum. Selanjutnya diperoleh informasi pula bahwa mekanisme pengendalian *soft-starter* pada motor induksi tiga fase dapat dilakukan dengan memberikan tegangan *ramp-up* melalui penggeseran pulsa pemicuan *thyristor* dari sudut yang besar ke arah sudut yang kecil, sehingga tegangan input naik secara graduatif. Seiring naiknya tegangan input, detektor torsi maksimum memantau keadaan torsi awal, dan jika

torsi telah mencapai nilai maksimum, sudut pemicuan ditempatkan pada sudut pemicuan minimum.

Kajian deduktif maupun induktif yang telah diuraikan di muka juga menghasilkan kesimpulan bahwa pendeteksian *stall* sebagai usaha proteksi mesin listrik, dapat dilakukan dengan cara melengkapi pengendali tegangan menggunakan sensor GGL Lawan. Pada metode ini, jika GGL Lawan terdeteksi mencapai nilai nol yang ditunjukkan oleh munculnya fenomena *zero cross*, maka sistem menganggap terjadi *stall*, sehingga pengendali akan mengirim sinyal pengaktif *breaker* untuk memutus catu daya pada setiap fase tegangan. Selain itu, metode proteksi dari keadaan *stall* juga dapat dilakukan dengan menggunakan sensor arus. Melalui metode ini, jika sensor mendeteksi nilai arus stator mencapai batas ambang yang merepresentasikan keadaan *stall*, pengendali mengaktifkan sinyal *breaker* untuk memutus setiap fase tegangan catu sehingga motor terhindar dari keadaan rusak. Berbagai metode proteksi motor tersebut seperti metode GGL Lawan dan metode sensor arus dapat dipilih sesuai dengan tujuan pengembangan dan pertimbangan-pertimbangan teknis saat proses pembangunan sistem dilakukan.

Mengingat kenyataan bahwa penggunaannya sebagai sarana simulasi bidang teknik elektro telah banyak dilakukan, dan sudah diberikan kepada mahasiswa pada semester-semester awal, maka simulator sistem kendali motor berkinerja tinggi dapat diimplementasikan menggunakan program SIMULINK dari Matlab.

E. Metode Pengembangan Simulator

Pengembangan sebuah simulator sebagai perangkat pembelajaran dapat dilakukan melalui berbagai pendekatan menggunakan model pengembangan yang telah diterapkan oleh para ahli. Sebuah perangkat pembelajaran yang dikembangkan, akan memiliki model dari level hipotetik sampai implementatif. Jika model hipotetik dari suatu perangkat pembelajaran telah diperoleh, pengembangan model dapat diteruskan ke pengembangan model perangkat pembelajaran level implementatif. Salah

satu model level implementatif yang banyak digunakan untuk pengembangan produk pembelajaran adalah model yang mengikuti siklus analisis, disain, pengembangan, implementasi dan evaluasi atau *analysis, design, development, implementation, evaluation* disingkat ADDIE, seperti model yang pernah digunakan oleh (Branch & Deissler, 2008: 207).

Dalam model ADDIE, pengembangan diawali dari bagian analisis, berturut-turut diteruskan ke bagian disain, pengembangan, implementasi dan evaluasi. Pada tiap bagian dapat dilakukan evaluasi untuk memperoleh hasil pengembangan produk terbaik. Tabel 6 berikut ini merupakan langkah-langkah ADDIE untuk membangun media pembelajaran yang diadopsi dari prosedur pengembangan model pembelajaran dari Molenda & Boling (2008: 109).

Tabel 6.

Langkah ADDIE Disesuaikan Untuk Pengembangan Media Pembelajaran
Simulator Sistem Kendali Mesin Listrik Berkinerja Tinggi

| Langkah | Deskripsi |
|--------------|---|
| Analisis | <ul style="list-style-type: none"> a. Mengidentifikasi kebutuhan media yang diperlukan untuk mendukung belajar siswa/mahasiswa pada suatu topik pembelajaran b. Menganalisis media yang telah digunakan untuk menentukan sasaran pada aspek kognitif, afektif dan psikomotorik dari tujuan penggunaan media c. Menentukan jenis keterampilan yang diharapkan dimiliki siswa/mahasiswa sebagai dampak penggunaan media d. Menganalisis ketersediaan waktu penggunaan media untuk mencapai hasil belajar yang baik |
| Disain | <ul style="list-style-type: none"> a. Menentukan jenis media yang akan digunakan b. Menerjemahkan tujuan pembelajaran ke dalam unsur-unsur media yang akan dikembangkan c. Menentukan model konseptual dan spesifikasi media yang akan dikembangkan d. Menentukan waktu yang dibutuhkan dalam penggunaan media e. Melakukan eksplorasi pustaka untuk memilih rancangan dan kriteria pengujian validitas media dari sisi kinerjanya f. Menggambarkan rancangan perangkat keras dan perangkat lunak dari media yang akan dikembangkan dalam bentuk blok diagram g. Menggambarkan rancangan <i>Graphical User Interface</i> (GUI) sesuai kebutuhan penggunaan media dalam bentuk blok diagram |
| Pengembangan | <ul style="list-style-type: none"> a. Memutuskan rancangan media yang akan digunakan dari aspek perangkat keras dan perangkat lunaknya b. Menentukan basis perangkat lunak yang akan digunakan c. Menyusun unsur-unsur media ke dalam satu kesatuan yang terintegrasi menggunakan basis perangkat lunak yang telah dipilih d. Mengatur GUI dengan memperkirakan dapat bersifat <i>user friendly</i> e. Menguji coba media dari aspek kinerjanya berdasarkan kriteria performansi f. Menguji coba media dalam pandangan ahli g. Merevisi dan menghaluskan media h. Menguji coba dampak pembelajaran media ke mahasiswa i. Menyelenggarakan pelatihan untuk guru/dosen |
| Implementasi | <ul style="list-style-type: none"> a. Melakukan sosialisasi produk yang telah dikembangkan agar dapat digunakan oleh guru/dosen dan siswa/mahasiswa b. Menyediakan bantuan atau dukungan yang dibutuhkan |
| Evaluasi | <ul style="list-style-type: none"> a. Melakukan evaluasi terhadap siswa/mahasiswa dan program b. Melakukan perawatan produk c. Merevisi produk |

V | HASIL PENGEMBANGAN DAN PEMBAHASAN

Melalui bagian Pendahuluan di muka telah dijelaskan bahwa monograf ini menggunakan metode penyelesaian masalah dengan model ADDIE, oleh sebab itu pada bab ini akan dideskripsikan hasil pengembangan produk perangkat pembelajaran Simulator Sistem Kendali Mesin Listrik Berkinerja Tinggi berbasis perangkat lunak SIMULINK merujuk langkah-langkah metode tersebut. Selain itu, pada akhir uraian akan dikemukakan juga hasil uji validitas media dalam rangkaian evaluasi formatif meliputi *on-going testing*, *alpha testing*, dan *beta testing* serta hasil uji dampak penggunaan media melalui evaluasi sumatif.

A. Analisis

Tahap analisis diawali dengan proses identifikasi media yang dibutuhkan untuk mendukung perkuliahan/praktikum Mesin-mesin Listrik atau Sistem Proteksi khususnya materi sistem kendali berkinerja tinggi motor induksi tiga fase. Analisis yang telah dilakukan menemukan kondisi bahwa di lapangan--tempat penelitian dilakukan--memang sudah terdapat beberapa media yang bersifat *hands-on*, terutama yang digunakan di laboratorium, seperti modul motor listrik DC dan AC, dan modul sistem kendali tegangan menggunakan *pulse width modulation* (PWM). Namun, media *hands-on* yang tersedia tersebut sangat sedikit, baik dari sisi jumlah maupun jenis, bahkan untuk sistem kendali tegangan menggunakan *thyristor* belum tersedia, termasuk sistem kendali yang dilengkapi dengan unit proteksi yang mengandung *soft-starter* dan detektor *stall*. Berdasarkan hasil analisis tersebut, dengan memperhatikan aspek efisiensi biaya, fleksibilitas dan kenyamanan penggunaan, dapat ditetapkan jenis/bentuk media yang akan dikembangkan yakni simulator sistem kendali motor

berkinerja tinggi dengan pengendali tegangan menggunakan thyristor berbasis SIMULINK dari MATLAB.

Selain itu, pada tahap ini dilakukan juga analisis terhadap semua jenis perangkat pembelajaran/media yang telah digunakan seperti modul-modul praktikum di laboratorium mesin listrik, agar dapat ditentukan tujuan pembelajaran pada aspek kognitif, psikomotorik dan afektif. Setelah dilakukan analisis terhadap media-media yang digunakan tersebut, baik sebagai pendukung pembelajaran di kelas maupun sebagai modul praktik di laboratorium, dapat dirumuskan tujuan pembelajaran Mesin-mesin Listrik, yakni mahasiswa dapat memahami karakteristik, cara kerja, aplikasi, dan cara pengendalian mesin listrik DC, mesin listrik AC/induksi termasuk transformator dan mesin sinkron. Khusus untuk topik mesin listrik AC atau induksi, rumusan tujuan pembelajarannya adalah agar mahasiswa memahami karakteristik, cara kerja dan cara pengendalian motor AC/induksi termasuk pengendalian untuk peningkatan kinerja mesin dengan sistem proteksi soft-starter dan detektor stall terpasang di dalamnya.

Selanjutnya, dilakukan analisis untuk menentukan keterampilan-keterampilan teknis yang dapat diharapkan sebagai dampak penggunaan media yang akan dikembangkan. Atas dasar analisis yang telah dilakukan, dapat dirumuskan keterampilan teknis yang diharapkan dapat ditumbuhkan melalui penerapan media, yakni mahasiswa terampil dalam:

1. menggambarkan diagram blok sistem kendali motor induksi berkinerja tinggi yang dilengkapi dengan unit proteksi;
2. merangkai pengendali tegangan dengan *thyristor* untuk motor induksi tiga fase;
3. melakukan setting-up urutan pulsa pemicuan *thyristor* yang benar pada pengendali tegangan motor induksi tiga fase;
4. melakukan eksperimen untuk menentukan sudut pemicuan minimum pada pengendali tegangan menggunakan *thyristor*;
5. menginstalasi dan mengoperasikan dengan benar motor induksi tiga fase yang dilengkapi unit proteksi *soft-starter* dan detektor stall;
6. melakukan pengukuran besaran-besaran motor induksi

- menggunakan instrumen listrik tiga fase dan *storage oscilloscope*;
7. melakukan eksperimen untuk menentukan karakteristik motor induksi tiga fase yang dikendalikan oleh unit *soft-starter* dan *stall detector*; dan
 8. mengatur kecepatan *soft-start* yang tepat untuk jenis motor tertentu.

Analisis diakhiri dengan menentukan waktu yang sesuai dari penggunaan simulator yang dikembangkan. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, media yang ada dalam monograf ini, baik sebagai media pembelajaran di dalam kelas, perangkat praktik di laboratorium, maupun untuk keperluan belajar mandiri mahasiswa, penggunaannya memerlukan waktu 90 menit. Penetapan waktu penggunaan ini sangat penting, karena nantinya akan dimasukkan sebagai bagian dari spesifikasi produk yang dikembangkan.

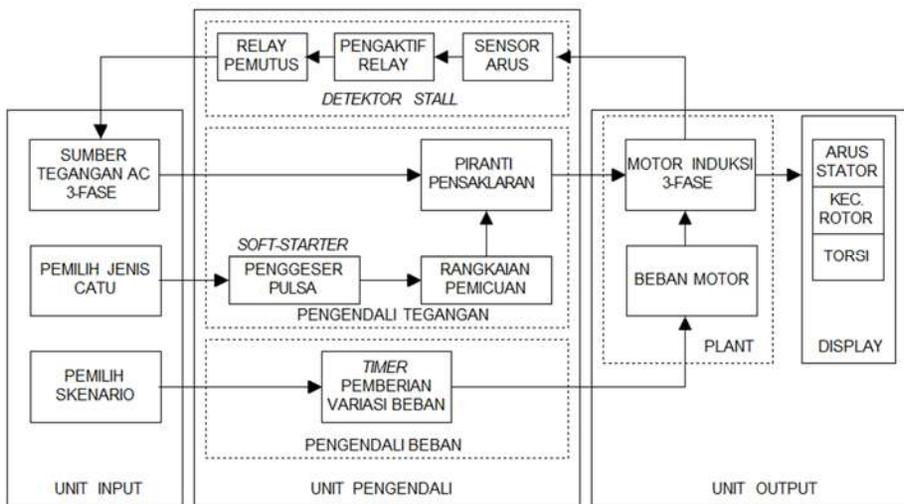
B. Desain

Langkah awal pada tahap ini adalah menentukan jenis media yang akan digunakan, dalam hal ini jenis medianya adalah simulator sistem kendali motor berkinerja tinggi berbasis SIMULINK dari MATLAB. Selanjutnya disusun spesifikasi produk yang meliputi perangkat keras/lunak, fitur dan aspek yang terlibat dalam penggunaan simulator yang dikembangkan. Penyusunan spesifikasi media, dilakukan berdasarkan hasil analisis tahap sebelumnya dengan memperhatikan kebutuhan dan kondisi lapangan, aspek efisiensi biaya, fleksibilitas dan kenyamanan penggunaan, tujuan pembelajaran serta keterampilan teknis yang diharapkan. Dalam monograf ini, spesifikasi produk ditunjukkan pada Tabel 7 berikut ini.

Tabel 7. Spesifikasi Simulator Sistem Kendali Motor Induksi Tiga Fase Berkinerja Tinggi

| Perangkat/Fitur/Aspek | Spesifikasi |
|-----------------------|--|
| Perangkat Keras | PC/Laptop dengan: frekuensi <i>clock</i> prosesor minimal 1,8 GHz, kapasitas memori internal 2GB, kapasitas <i>harddisk</i> minimal 500 GB, resolusi monitor 1366x768 dpi (dot per inci) |
| Perangkat Lunak | Sistem Operasi: Windows 7 di dalamnya terpasang program MATLAB minimal Versi 7 yang dapat menjalankan SIMULINK |
| Panel | <ul style="list-style-type: none"> • Menyediakan saklar Pemilih Skenario: Operasi Beban Normal dan Beban Lebih • Menyediakan Pemilih Mode Catu Daya: Langsung, <i>Soft Start</i> Cepat, <i>Soft Start</i> Sedang, dan <i>Soft Start</i> Lambat • Menyediakan <i>display</i> output untuk arus stator dan rotor, torsi elektromagnetik, kecepatan putar rotor, tegangan fase, dan pulsa pemicu dalam fungsi waktu |
| Model Motor | <ul style="list-style-type: none"> • Jenis: induksi <i>squirrel cage</i> • <i>Name Plate</i>: (1) 3 HP, 60 Hz, 220 V, 1725 rpm; (2) 5,4 HP, 400 V, 50 Hz, 1430 rpm; (3) 10 HP, 400 V, 50 Hz, 1440 rpm; (4) 20 HP, 400 V, 50 Hz, 1460 rpm; (5) 50 HP, 400 V, 50 Hz, 1480 rpm; (6) 100 HP, 400 V, 50 Hz, 1484 rpm; (7) 150 HP, 400 V, 50 Hz, 1487 rpm; (8) 215 HP, 400 V, 50 Hz, 1487 rpm |
| Model Sistem Kendali | <ul style="list-style-type: none"> • Jenis: pengendalian tegangan stator menggunakan 6 buah <i>thyristor</i> sebagai <i>switching</i> dengan konfigurasi <i>back-to-back</i> pada setiap fase dan dilengkapi generator pulsa tersinkronisasi • Fitur Kinerja Tinggi: <i>soft-starter</i> untuk keadaan transien dan detektor <i>stall</i> untuk keadaan <i>steady-state</i> |
| Mode Tegangan Catu | <ul style="list-style-type: none"> • Langsung dengan sudut Alpha minimum sebesar 19° listrik • Tegangan <i>ramp-up</i> sebanyak 3 pilihan: cepat, sedang dan lambat |
| Skenario Operasi | <ul style="list-style-type: none"> • Operasi Beban Normal: sistem diberi beban konstan normal selama 10 s (t=0 s.d. t=10 s) • Operasi Beban Lebih: sistem diberi beban bervariasi dengan kondisi Normal-1 selama 6 s (t=0 s.d. t=6 s), kondisi Normal-2 selama 2 s (t=6 s s.d. t=8 s), dan kondisi beban lebih selama 2 s (t=8 s s.d. 10 s) |
| Aspek Pedagogi | <ul style="list-style-type: none"> • <i>User</i>: Dosen/mahasiswa jurusan Teknik Elektro dan jurusan sejenis • Mata Kuliah: Pengendalian Mesin Listrik, Instalasi Listrik, dan Sistem Proteksi • Prasyarat: dapat mengoperasikan SIMULINK dari MATLAB • Penggunaan: Media pembelajaran di kelas, <i>virtual lab</i> untuk praktik di laboratorium • Waktu penggunaan: 90 menit sebagai media di kelas atau piranti <i>virtual lab</i> |

Langkah selanjutnya adalah menetapkan model pengembangan yang digunakan, dan dalam monograf ini dipilih model pengembangan konseptual. Model konseptual perlu disusun terlebih dahulu, karena model inilah yang akan memandu proses terciptanya produk perangkat pembelajaran dalam bentuk simulator sistem kendali motor listrik berkinerja tinggi, sesuai spesifikasi yang diharapkan. Penyusunan model konseptual sepenuhnya mengacu pada Kajian Pustaka, sehingga penyusunannya tidak boleh berdasarkan persepsi pribadi yang tidak didukung teori yang valid. Berdasarkan kajian pustaka yang telah dilakukan di muka, model konseptual produk yang dikembangkan dapat disusun seperti ditunjukkan pada Gambar 23 di bawah ini.



Gambar 23. Model Konseptual Produk Simulator

Merujuk Gambar 23, secara koseptual, komponen-komponen produk dapat diklasifikasikan ke dalam tiga domain yakni unit input, unit pengendali dan unit output. Pada unit input, produk ini mengandung (1) sumber tegangan AC 3-fase; (2) panel pemilih jenis catu (*Supply Mode Selector*) terdiri atas catu langsung dengan sudut pemicuan konstan minimum (*Minimum Aplha Supplied*), catu tegangan *ramp-up* dengan tiga pilihan *Faster Soft Start*, *Medium Soft Start*, dan *Slower Soft Start*; (3)

pemilih skenario (*Scenario Selector*) terdiri atas skenario operasi normal (*Normal Operation*) dan skenario operasi beban lebih (*Overload Operation*).

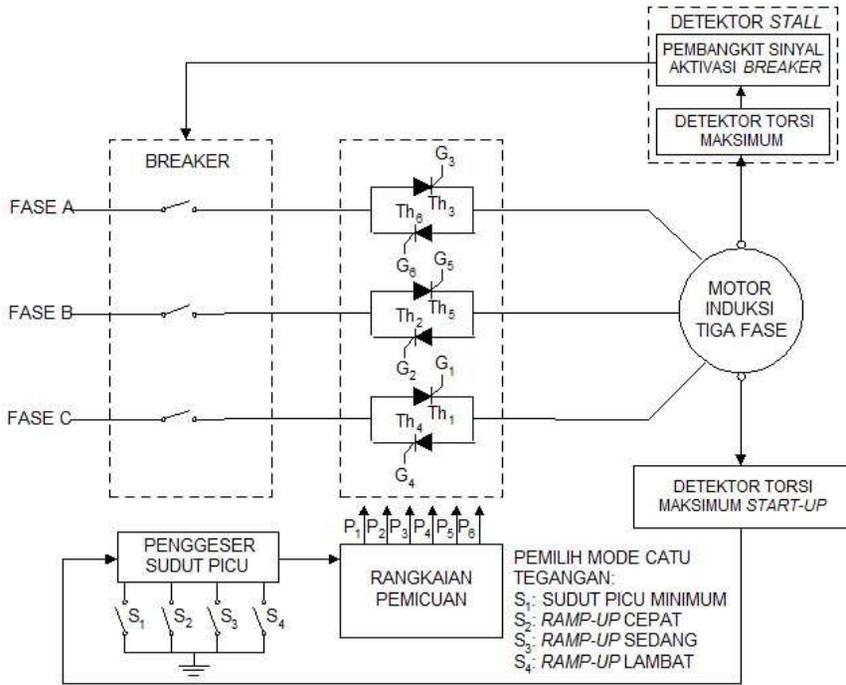
Pada unit pengendali, terkandung tiga sub unit yakni pengendali tegangan, detektor *stall*, dan pengendali beban. Kelengkapan-kelengkapan pada pengendali tegangan terdiri atas:

1. piranti pensaklaran berupa enam buah *thyristor* yang membentuk konfigurasi pasangan anti paralel (*back-to-back*) terpasang pada setiap fase tegangan catu;
2. rangkaian pemucuan berupa pembangkit enam buah pulsa tersinkronisasi; dan
3. sebuah unit *soft-starter* dalam bentuk rangkaian penggeser pulsa.

Pada sub unit detektor *stall* terpasang: (1) rangkaian sensor arus; (2) rangkaian pengaktif *relay*; dan (3) komponen *relay* pemutus (*breaker*), sedangkan untuk sub unit pengendali beban menyediakan fasilitas *timer* untuk mengatur variasi pemberian beban. Sementara itu, pada unit output terpasang *plant* berupa motor induksi tiga fase dengan beban yang dapat diubah-ubah nilainya. Untuk menampilkan besaran-besaran motor yang diperlukan, unit output dilengkapi dengan *display* yang dapat menampilkan grafik arus stator/rotor, kecepatan rotor, dan torsi elektromagnetik yang dibangkitkan dalam fungsi waktu.

Pada tahap desain ini dilakukan juga eksplorasi berbagai pustaka sebagai dasar untuk memilih bentuk rancangan yang sesuai dan berbagai kriteria yang diperlukan dalam pengujian kinerja simulator. Berdasarkan kajian pustaka yang telah dideskripsikan pada bab-bab sebelumnya, telah berhasil dikumpulkan berbagai desain sistem kendali motor induksi tiga fase berkinerja tinggi. Desain-desain dari Mohan *et al.* (2003), Rafeek, *et al.* (2013), Nithin, Jos & Rafeek (2013), Eaton Corporation (2013), Rockwell Automation (2014), Ryu, Jeon & Shon (2016), Jun, Yao & Xia-hui (2016), dan Trivedi, *et al.* (2017) telah menjadi sumber referensi dan inspirasi pengembangan unit *soft-starter* yang menjadi bagian dari sistem kendali berkinerja tinggi yang dikembangkan dalam monograf ini. Sementara itu,

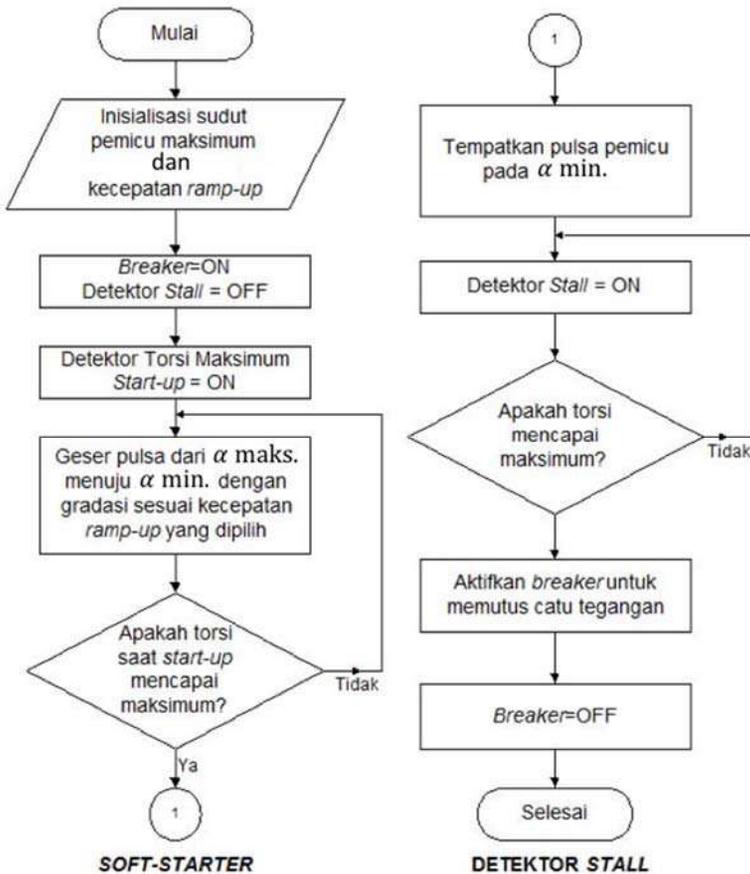
rancangan pengendali dari Unsworth (1988), Freescale Semiconductor, Inc. (Mackay, 2004), STMicroelectronics (2013), ON-Semiconductor (2015), Borse, Pandhare & Kumar (2015), dan Singh, *et al.* (2017) telah menjadi sumber ide pengembangan unit *stall detector*. Merujuk sumber-sumber yang telah digali tersebut, dapat digambarkan rancangan perangkat keras dari media yang dikembangkan seperti ditunjukkan pada Gambar 24.



Gambar 24.

Arsitektur Perangkat Keras Sistem Kendali Motor Berkinerja Tinggi

Berdasarkan eksplorasi pustaka, selain dapat dikembangkan arsitektur perangkat keras seperti Gambar 24 di atas, dapat pula dirancang algoritma pengendalian seperti ditunjukkan pada Gambar 25 berikut ini.



Gambar 25.

Algoritma Pengendalian Sistem Kendali Motor Berkinerja Tinggi

Pada tahap desain ini, dilakukan pula perancangan *Graphical User Interface* (GUI) sesuai kebutuhan penggunaan media dalam bentuk blok diagram. Rancangan GUI menjadi perhatian utama karena implementasi media pembelajaran ini berbentuk simulator yang memerlukan antarmuka bersifat *user friendly*, agar dapat mewakili keadaan yang sesungguhnya dan mudah dioperasikan. Selain mengacu pada model konseptual produk yang dikembangkan seperti pada Gambar 23 di atas, perancangan GUI juga memperhatikan tata letak komponen sistem kendali dan keragaman jenis panel yang nantinya akan dioperasikan oleh pengguna. Panel-panel pada produk ini terdiri atas panel input, panel output/*display* alat ukur, dan panel

untuk keterangan. Agar pengguna mudah dalam mengidentifikasinya, panel-panel tersebut diberi warna yang berbeda, misalnya panel input diberi warna kuning, panel output berwarna hijau, dan untuk panel keterangan diberi warna biru. Rancangan GUI simulator pada monograf ini yang diturunkan dari model konseptual produk ditunjukkan pada Gambar 26.



Gambar 26. Rancangan GUI Simulator Sistem Kendali Motor Induksi Berkinerja Tinggi

Rancangan GUI simulator boleh jadi akan berbeda antar pengembang satu dengan pengembang lainnya dari sisi tata letak, penamaan, pewarnaan bagian maupun aspek-aspek lainnya. Perbedaan tersebut tidak bermasalah selama pengembang menggunakan prinsip-prinsip penyusunan GUI dengan memperhatikan kemudahan operasi oleh penggunanya.

C. Pengembangan

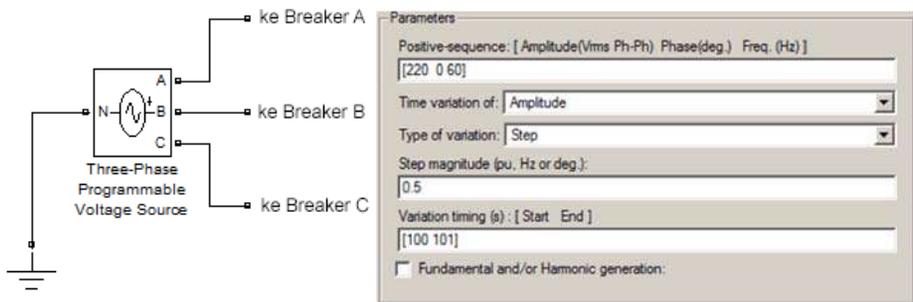
Kegiatan awal pada tahap ini adalah penentuan jenis perangkat keras dan perangkat lunak serta basis pengembangan yang akan digunakan untuk membangun simulator. Telah disebutkan di muka bahwa pengembangan perangkat pembelajaran ini lebih banyak mempertimbangkan aspek efisiensi biaya, fleksibilitas penggunaan dan kemenarikan penggunaan, oleh

sebab itu dipilih media berbentuk simulator. Oleh karena bersifat *user friendly* dan telah banyak digunakan oleh mahasiswa dan dosen teknik elektro, maka dipilih perangkat lunak SIMULINK dari MATLAB sebagai basis pengembangan simulator pada monograf ini.

Melalui tahap ini, selanjutnya disusun unsur-unsur media dan mengintegrasikannya ke dalam satu kesatuan simulator berdasar pada basis perangkat lunak yang dipilih yakni SIMULINK. Pada fase ini dilakukan pula penyusunan GUI secara cermat agar bersifat *user friendly*. Berdasarkan model konseptual yang telah ditetapkan di muka dan basis pengembangan yang digunakan, maka dalam monograf ini dapat ditetapkan unsur-unsur dalam media yang meliputi unit-unit sebagai berikut.

1. Unit Input

Pada unit ini terkandung sumber tegangan AC tiga fase yang berfungsi memberikan catu daya pada sistem yang dibangun. Sumber tegangan ini diambil dari *Simulink Library/ SimPowerSystems/ Electrical Sources/ Three-Phase Programmable Voltage Source* seperti ditunjukkan pada Gambar 27.



Gambar 27. Sumber Tegangan AC Tiga-Phase dan Pengaturan Parameternya Untuk Motor 3HP

Pengaturan pada Gambar 27 hanya untuk motor jenis 3 HP saja yang memiliki tegangan catu 220V, sedangkan untuk motor jenis lainnya yang menjadi sampel kajian ini yakni: 5,4 HP, 10 HP, 20 HP, 50 HP, 100 HP, 150 HP, dan 215 HP, tegangan catunya sebesar 400 V dengan

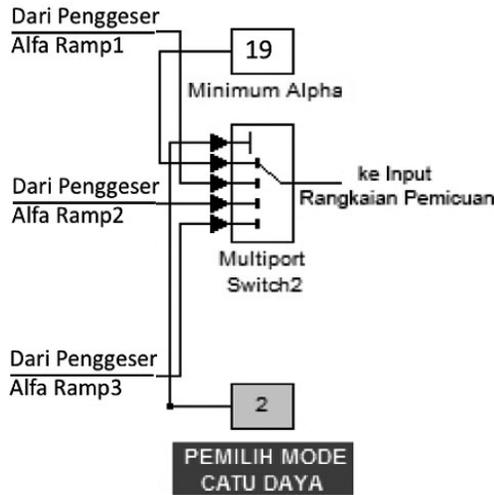
frekuensi 50 Hz, sehingga parameteranya menjadi [400 0 50]. Monograf ini menetapkan 8 buah motor induksi tiga fase yang dianggap mewakili spektrum dayanya, sebagai sampel kajian. Motor dengan *name plate* 215 HP, 150 HP, 100 HP dianggap mewakili jenis motor berdaya tinggi, 50 HP, 20 HP mewakili motor berdaya sedang dan 10 HP, 5,4 HP, 3 HP mewakili motor berdaya rendah. Berdasarkan penetapan sampel ini, maka pengembangan sistem dan ujobanya dilakukan terhadap 8 jenis motor tersebut. Parameter jenis motor yang digunakan sebagai sampel ditunjukkan pada Tabel 8 berikut ini.

Tabel 8. Jenis Motor Induksi Sampel Kajian

| No. | Jenis Motor/ Name Plate | Parameter | | | | | | | |
|-----|---------------------------------------|-----------------|----------|-----------------|----------|---------|------------------------|----------|---|
| | | Rs (Ω) | Lls (H) | Rr (Ω) | Llr (H) | Lm (H) | J (kg.m ²) | F(N.m.s) | p |
| 1 | 215HP (160KW), 400V, 50Hz, 1487rpm | 0,01379 | 0,000152 | 0,007728 | 0,000152 | 0,00769 | 2,9 | 0,05658 | 2 |
| 2 | 150HP (110KW), 400V, 50Hz, 1487rpm | 0,02155 | 0,000226 | 0,01231 | 0,000226 | 0,01038 | 2,3 | 0,05421 | 2 |
| 3 | 100HP (75KW), 400V, 50 Hz, 1484rpm | 0,03552 | 0,000335 | 0,02092 | 0,000335 | 0,0151 | 1,25 | 0,03914 | 2 |
| 4 | 50HP (37KW), 400V, 50 Hz, 1480rpm | 0,08233 | 0,000724 | 0,0503 | 0,000724 | 0,02711 | 0,37 | 0,02791 | 2 |
| 5 | 20HP (15KW), 400V, 50Hz, 1460rpm | 0,2147 | 0,000991 | 0,2205 | 0,000991 | 0,06419 | 0,102 | 0,009541 | 2 |
| 6 | 10HP (7,5KW), 400V, 50Hz, 1440rpm | 0,7384 | 0,003045 | 0,7402 | 0,003045 | 0,1241 | 0,0343 | 0,000503 | 2 |
| 7 | 5,4HP (4KW), 400V, 50Hz, 1430rpm | 1,405 | 0,005839 | 1,395 | 0,005839 | 0,1722 | 0,0131 | 0,002985 | 2 |
| 8 | 3HP, 220V, 60Hz, 1725rpm | 0,435 | 0,004 | 0,816 | 0,002 | 0,06931 | 0,089 | 0 | 2 |

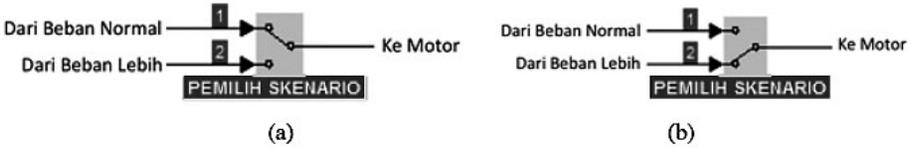
Unit lain yang tersemat di dalam unit input adalah pemilih jenis catu yang menyediakan empat pilihan yakni *direct-on-line supplied* dengan sudut pemucuan alfa konstan (pilihan 1), dan *soft-start* cepat (pilihan 2), sedang (pilihan 3) dan lambat (pilihan 4). Pada dasarnya, pemilih jenis catu adalah rangkaian dengan komponen utama saklar *multiport* yang memiliki empat buah input dan satu buah output. Salah satu inputnya dihubungkan ke sumber nilai alfa konstan, dan tiga input lainnya ke

penggeser nilai alfa, sementara outputnya ke rangkaian pemecuan. Unit ini dilengkapi dengan blok pemilih (berwarna kuning) yang memungkinkan dapat diisikan ke dalamnya suatu konstanta melalui *key in* sebagai pengendali saklar *multiport* seperti ditunjukkan pada Gambar 28.



Gambar 28. Pemilih Jenis Catu (*Supply Mode Selector*)

Rangkaian terakhir pada unit input adalah pemilih skenario. Sebagai perangkat pembelajaran, operasi motor pada simulator ini perlu dikondisikan dalam berbagai situasi untuk menunjukkan kemampuan sistem kendali dalam mengantisipasi melonjaknya arus dan torsi saat *start-up* serta mengantisipasi perubahan-perubahan torsi beban saat *steady-state* yang dapat menyebabkan *stall*. Perangkat ini menyediakan dua jenis skenario operasi yakni normal (*normal operation*) dan beban lebih (*overloaded operation*). Pemilih skenario berbentuk saklar, seperti ditunjukkan pada Gambar 29. Arti dari notasi pada saklar adalah 1 untuk *normal operation* dan 2 untuk *overloaded operation*.



Gambar 29. Saklar Pemilih Skenario:

(a) *Normal Operation*, (b) *Overloaded Operation*

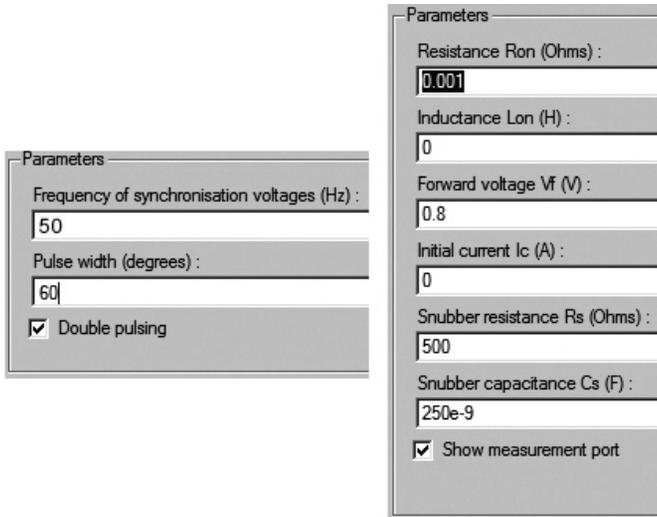
Berdasarkan eksperimen simulatif, telah dapat ditetapkan nilai torsi beban agar motor beroperasi secara normal maupun dalam keadaan *overloaded* untuk masing-masing jenis motor seperti ditunjukkan pada Tabel 9 berikut ini.

Tabel 9. Beban Motor Untuk Operasi Normal dan *Overloaded*

| Jenis Motor | Torsi Beban Motor | | |
|-------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|
| | Normal 1 ($t=0$ s s.d. $t=6$ s) | Normal 2 ($t=6$ s s.d. $t=8$ s) | <i>Overloaded</i> ($t=8$ s s.d. $t=10$ s) |
| 215 HP | 380 N | 760 N | 4500 N |
| 150 HP | 277 N | 554 N | 3200 N |
| 100 HP | 213,5 N | 427 N | 2400 N |
| 50 HP | 110 N | 220 N | 1100 N |
| 20 HP | 42 N | 84 N | 700 N |
| 10 HP | 22 N | 44 N | 250 N |
| 5,4 HP | 11 N | 22 N | 130 N |
| 3 HP | 14,5 N | 29 N | 150 N |

Pemilihan skenario pertama (operasi normal) akan menyebabkan motor diberi torsi beban konstan yang besarnya sesuai dengan kolom Normal 1 pada Tabel 9 selama waktu berlangsungnya simulasi. Pada mode normal ini, motor tidak mengalami gangguan penambahan beban baik beban normal maupun beban lebih selama keadaan transien sampai dengan *steady-state*. Skenario kedua adalah motor diberi beban yang berubah setelah kondisi transien, yakni sesaat setelah $t=6$ s dengan beban seperti pada kolom Normal 2 dan sesaat setelah $t=8$ s seperti pada kolom *Overloaded*. Gangguan pertama dengan tambahan torsi beban seperti

Agar sistem utama yang dibangun ini dapat bekerja dengan baik, perlu dilakukan pengaturan parameter blok-blok yang digunakan seperti ditunjukkan pada Gambar 31.

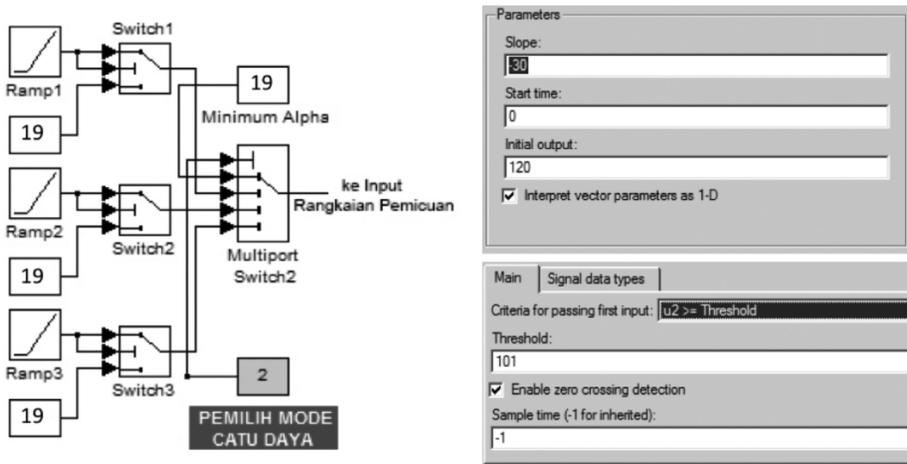


Gambar 31. Parameter Rangkaian Pemicuan (Kiri) dan *Thyristor* (Kanan)
Untuk $f = 50$ Hz

Pengaturan parameter-parameter dengan menggunakan nilai tersebut, menjadikan sistem pengendali tegangan yang dirancang dapat bekerja dengan baik ditinjau dari bentuk gelombang tegangan dan arus yang dihasilkan oleh motor yang dikendalikan. Hasil uji coba untuk menentukan kinerja sistem utama ini diuraikan pada bagian Uji Coba Produk. Dengan kondisi ini, maka pengendali tegangan siap disisipi unit *soft-starter* dan *stall detector* sebagai bagian dari sistem kendali motor berkinerja tinggi.

Sub unit lain yang terdapat dalam unit pengendali adalah rangkaian penggeser pulsa yang merupakan sumber dari rangkaian pemicuan. Rangkaian penggeser pulsa pada dasarnya adalah pembangkit bilangan *decrement* untuk sudut pemicuan alfa, yakni rangkaian yang dapat membangkitkan nilai alfa dari nilai maksimum menuju nilai minimum dalam satuan derajat listrik. Rangkaian penggeser pulsa pemicuan dalam format SIMULINK disajikan pada Gambar 32. Blok *Ramp* akan

membangkitkan pulsa pemicuan dengan nilai awal yang tinggi, selanjutnya nilai ini diturunkan seiring dengan bertambahnya waktu. Setelah mencapai nilai *threshold* (torsi elektromagnetik mencapai nilai maksimumnya), blok *Switch* akan memilih sudut pemicuan minimum untuk disalurkan ke input rangkaian pemicuan melalui saklar *multiport*.



Gambar 32. Kiri: Rangkaian Penggeser Pulsa,
Kanan: Parameter Untuk Blok *Ramp1* (atas) dan *Switch1* (bawah) Pada
Motor 50 HP

Agar rangkaian penggeser pulsa dapat bekerja dengan baik perlu dilakukan eksperimen untuk menentukan parameter-parameter blok yang digunakan. Melalui eksperimen, telah dapat ditentukan nilai parameter *Slope* pada blok *Ramp1*, *Ramp2*, *Ramp3* dan parameter *threshold* pada blok *Switch1*, *Switch2*, *Switch3* untuk beberapa jenis motor seperti ditunjukkan pada Tabel 10.

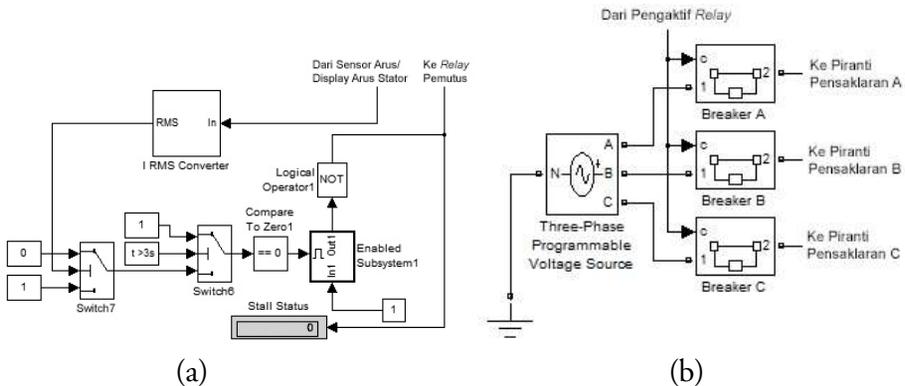
Tabel 10.

Nilai Parameter *Slope* dan *Threshold* Pada Rangkaian Penggeser Pulsa

| Jenis Motor | Alfa Minimum | Ramp1 | | Switch 1 | Ramp2 | | Switch 2 | Ramp 3 | | Switch 3 |
|-------------|--------------|-------|----------------|-----------|-------|----------------|-----------|--------|----------------|-----------|
| | | Slope | Initial Output | Threshold | Slope | Initial Output | Threshold | Slope | Initial Output | Threshold |
| 215 HP | 19 | -10 | 120 | 107 | -5 | 120 | 111,2 | -1 | 120 | 116,93 |
| 150 HP | 19 | -10 | 120 | 105,6 | -5 | 120 | 110,1 | -1 | 120 | 116,2 |
| 100 HP | 19 | -10 | 120 | 106,5 | -5 | 120 | 110,4 | -1,2 | 120 | 113,75 |
| 50 HP | 19 | -30 | 120 | 101 | -10 | 120 | 108.4 | -4 | 120 | 110.9 |
| 20 HP | 19 | -50 | 132 | 110 | -25 | 132 | 117 | -15 | 132 | 120 |
| 10 HP | 19 | -100 | 132 | 100 | -60 | 132 | 105 | -30 | 132 | 110 |
| 5,4 HP | 19 | -100 | 132 | 102 | -70 | 132 | 107 | -30 | 132 | 112 |
| 3 HP | 19 | -30 | 115 | 84 | -12 | 115 | 92 | -4 | 115 | 99.72 |

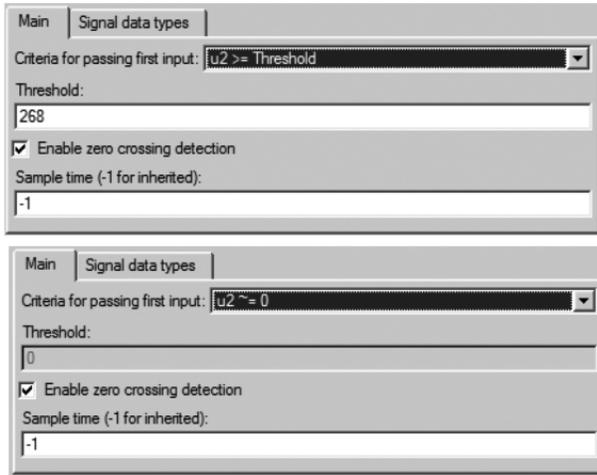
Kriteria untuk semua *switch* diatur dengan kondisi: sinyal input akan dilewatkan jika nilainya lebih besar dari nilai *threshold*. Nilai-nilai parameter tersebut merupakan nilai yang memberikan kinerja sistem kendali terbaik yang diperoleh melalui eksperimen. Melalui eksperimen juga telah diperoleh nilai alfa minimum sebesar 19 derajat listrik. Rangkaian pemilih jenis catu dan penggeser pulsa membentuk unit *soft-starter* yang merupakan unit dari sistem kendali motor berkinerja tinggi.

Sub unit lain pada unit pengendali adalah *stall detector* yang terdiri atas rangkaian sensor arus/torsi maksimum, pengaktif *relay*, dan *relay* pemutus. Rancangan sub unit *stall detector* dan parameter-parameter bloknya pada monograf ini ditunjukkan pada Gambar 33.



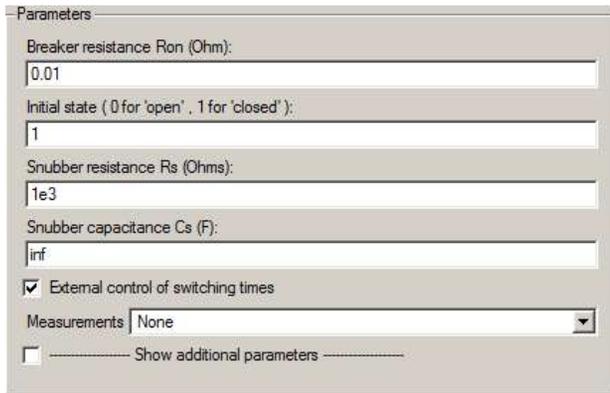
Gambar 33. Unit *Stall Detector* Terdiri Atas:
 (a) Pengaktif *Relay* dan (b) *Relay* Pemutus

Untuk motor jenis 215 HP, parameter blok pengaktif *relay* yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 34.



Gambar 34. Parameter Blok *Switch7* (Atas) dan *Switch6* (Bawah)

Sedangkan parameter untuk *relay* pemutus diatur agar dalam keadaan awal bersifat tertutup, seperti ditunjukkan pada Gambar 35.



Gambar 35. Parameter *Relay* Pemutus

Pemilihan parameter-parameter tersebut mengandung makna bahwa jika arus stator yang berasal dari sensor arus masih di bawah batas ambang atau *threshold*--dalam kasus ini nilainya 268 A bersesuaian

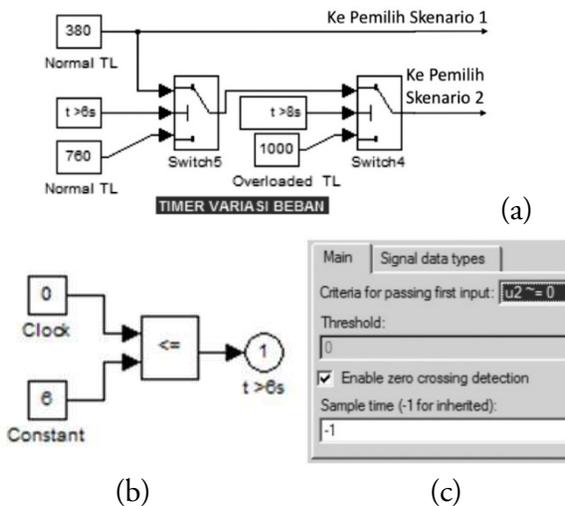
dengan kondisi torsi maksimum--maka *Switch7* akan memilih nilai 1 pada terminal input bawah untuk disalurkan ke outputnya yang ditangkap oleh *Switch6* sebagai input. Namun, jika arus yang masuk ke *Switch7* melebihi batas ambang, saklar ini akan memilih nilai 0 pada input atas untuk diteruskan ke outputnya. *Switch6* dikendalikan oleh *timer* dengan pengaturan akan bekerja menyalurkan input atas, jika waktu *running* motor sudah lebih besar dari 6 detik, sebaliknya akan menyalurkan input bawah untuk $t < 6$ detik. Jadi, jika setelah 6 detik dari saat motor melakukan *starting*, terjadi kenaikan torsi beban yang menyebabkan arus stator juga naik namun masih di bawah batas ambangnya, maka input bawah dari *Switch6* akan bernilai 1 (berasal dari *Switch7*) yang menyebabkan outputnya bernilai 1. Rangkaian *compare to zero* akan memberikan output 0 karena nilai inputnya 1, sehingga rangkaian *enable subsystem* tidak memperoleh pemicuan, berakibat outputnya 0, dan setelah masuk operator NOT outputnya bernilai 1 yang diperlukan sebagai sinyal pengendali *relay* agar keadaannya tertutup.

Sebaliknya, jika arus stator terdeteksi melebihi batas ambang 268 A, maka *Switch7* akan memilih input atas yang bernilai 0 untuk disalurkan ke outputnya, berakibat input bawah *Switch6* bernilai 0. Oleh karena $t > 6$ detik, maka input bawah ini akan dipilih oleh *Switch6* dan disalurkan ke outputnya. Nilai output *Switch6* yang bernilai 0 ini oleh piranti *compare to zero* diubah menjadi bernilai 1 yang akan memicu *enabled subsystem* sehingga menyalurkan nilai 1 pada input ke outputnya. Sebagai piranti yang bersifat *latched* (mengunci), *enabled subsystem* akan mempertahankan nilai 1 ini sampai terdapat pemicuan kembali dan oleh operator NOT nilai ini diubah menjadi bernilai 0. Selanjutnya output operator NOT ini akan berfungsi sebagai sinyal pengaktif untuk mematikan *relay*. Melalui eksperimen simulatif, telah dapat ditentukan nilai parameter *threshold* dari *Switch 7* untuk beberapa motor seperti ditunjukkan pada Tabel 11.

Tabel 11. Nilai Parameter *Threshold* Pada Unit *Stall Detector*

| Jenis Motor | <i>Threshold Switch 7 (A)</i> | <i>Threshold Switch 6 (A)</i> |
|-------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 215 HP | 268 | 0 |
| 150 HP | 209 | 0 |
| 100 HP | 169 | 0 |
| 50 HP | 106 | 0 |
| 20 HP | 50 | 0 |
| 10 HP | 24 | 0 |
| 5,4 HP | 14 | 0 |
| 3 HP | 40 | 0 |

Unit pengendali lain yang harus disusun melalui tahap pengembangan ini adalah rangkaian *timer* untuk pemberian variasi beban motor. Rangkaian ini, seperti ditunjukkan pada Gambar 36, digunakan untuk mendukung implementasi skenario *normal operation* dan *overloaded operation*. Pengaturan parameter dan konstanta pada *timer* yang memberikan kinerja terbaik dari rangkaian pemberi variasi beban ini, sebagai bagian dari unit pendukung skenario operasi sistem kendali motor berkinerja tinggi, ditunjukkan pada gambar 36 (c).



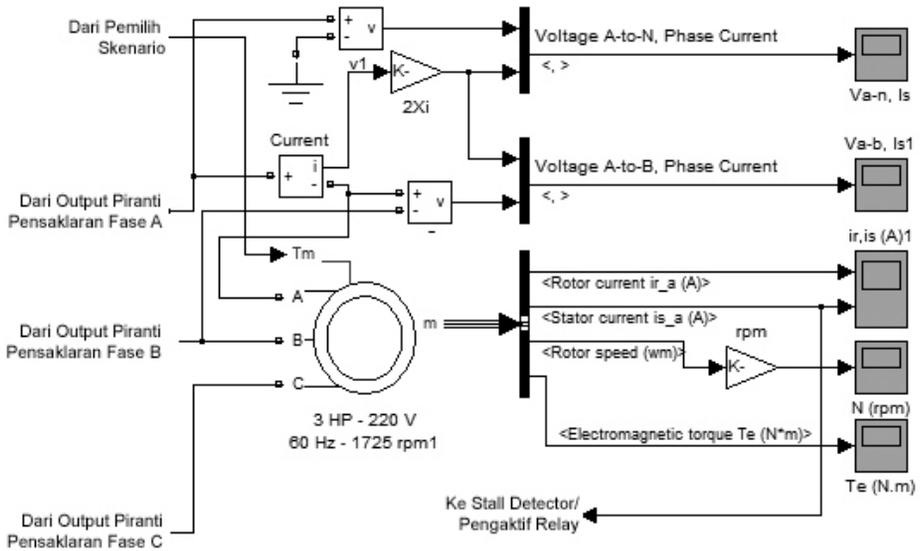
Gambar 36. *Timer* Pemberian Variasi Beban Untuk Motor 215 HP:

- (a) Rangkaian; (b) Struktur *Timer*; dan
- (c) Parameter untuk *Switch4* dan *Switch5*

Sesuai dengan rancangan skenario, pemberian variasi beban dilakukan setelah keadaan transien dan dalam monograf ini dipilih $t > 6$ detik. Untuk jenis motor 215 HP, pada skenario operasi normal, sejak saat awal motor melakukan *start-up*, beban normal 380 N m langsung disalurkan ke motor, dan untuk skenario beban bervariasi, setelah $t > 6$ detik *Switch5* akan menyalurkan beban 760 N m (masih dalam kategori normal), dan setelah $t > 8$ detik *Switch4* akan menyalurkan beban lebih 1000 N m ke motor (torsi beban lebih).

3. Unit Output

Unit output dari sistem terdiri atas sebuah motor induksi tiga fase dan unit *display* yang meliputi *display* arus stator dan rotor, kecepatan putar rotor, torsi elektromagnetik, tegangan eksitasi, tegangan dan arus fase seperti ditunjukkan pada Gambar 37.

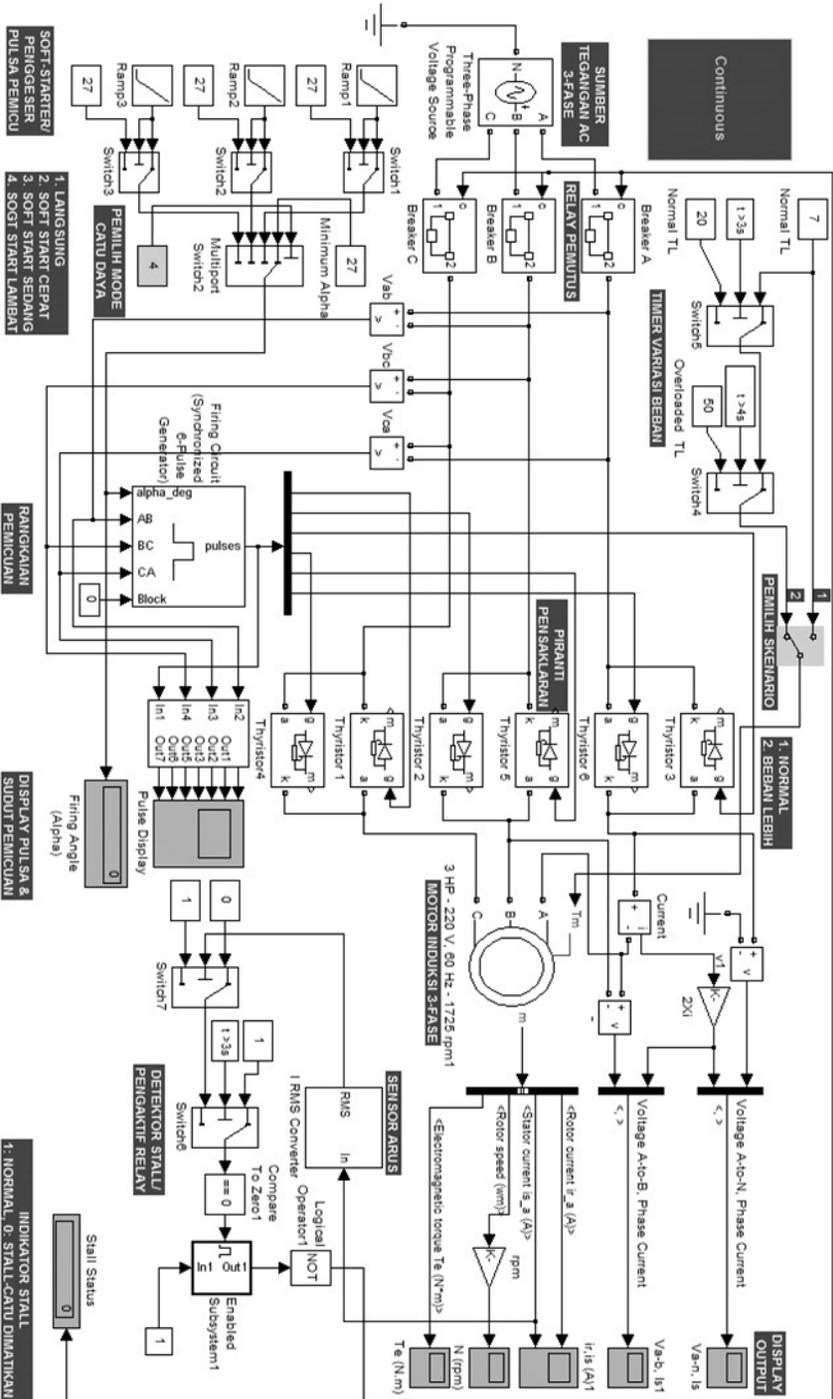


Gambar 37.

Unit Output Terdiri Atas Motor Induksi Tiga Fase dan Sub Unit Display

Selanjutnya dilakukan pengintegrasian sub-sub unit yang telah dirancang tersebut menjadi satu kesatuan simulator sistem kendali motor berkinerja tinggi seperti ditunjukkan pada Gambar 38 dan diuji

kinerjanya dari sisi unjuk kerjanya berdasarkan kriteria performansi dan berdasarkan pandangan para ahli.



Gambar 38. Perangkat Pembelajaran Berupa Simulator Sistem Kendali Motor Induksi Tiga Fase Berkinerja Tinggi Berbasis SIMULINK

D. Implementasi

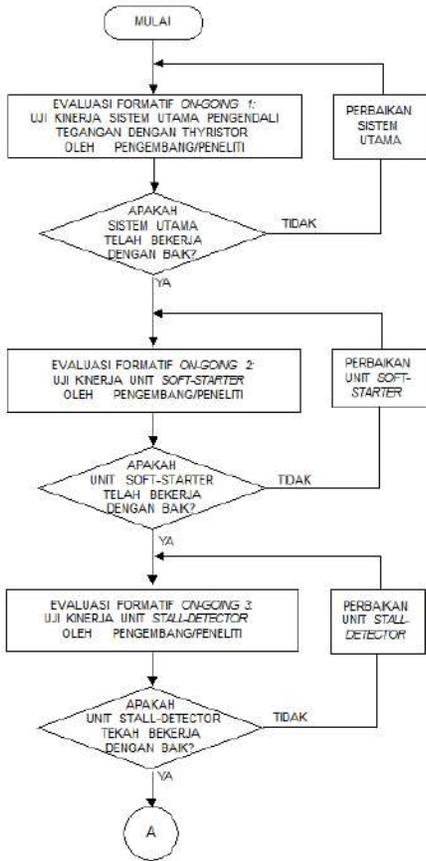
Kegiatan pada tahap implementasi yang terpenting adalah melakukan sosialisasi seluas-luasnya dalam berbagai bentuk tentang simulator yang telah dikembangkan agar dapat digunakan oleh dosen/guru serta mahasiswa/siswa dalam mendukung proses pembelajaran tentang sistem kendali motor induksi tiga fase berkinerja tinggi. Selain itu, pada fase implementasi ini pengembang juga perlu menyediakan bantuan dan dukungan yang diperlukan.

E. Evaluasi

Pada fase ini dilakukan evaluasi terhadap mahasiswa/siswa dan program pembelajaran yang melibatkan penggunaan simulator yang dikembangkan, perawatan produk dan revisi produk. Semua proses dari analisis sampai dengan evaluasi membentuk sebuah siklus yang progresif untuk menjamin tersedianya media yang semakin baik kinerjanya.

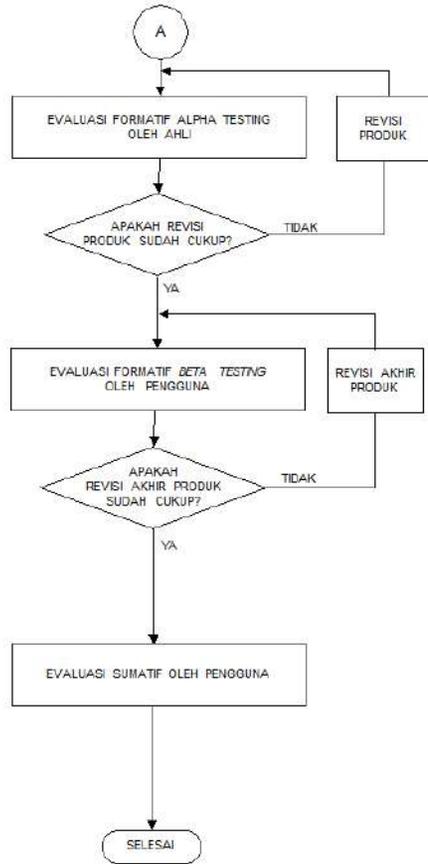
F. Uji Coba Produk

Ujicoba produk dilakukan untuk memperoleh kualitas media yang layak digunakan dalam mendukung pembelajaran melalui evaluasi terus-menerus dari saat produk mulai dikembangkan sampai dengan produk siap digunakan. Evaluasi terhadap media yang dikembangkan dapat menggunakan evaluasi formatif maupun sumatif. Menurut Surjono (2017: 92), evaluasi formatif dilakukan melalui tahap: (1) *on going evaluation* oleh pengembang/peneliti ketika proses pengembangan sedang berlangsung, untuk memastikan semua komponen dalam produk yang dibangun dapat berfungsi dengan baik; dan (2) *alpha testing* oleh para ahli serta *beta testing* oleh calon pengguna, untuk memberikan masukan-masukan perbaikan/revisi produk agar media yang diperoleh berkualitas, sedangkan evaluasi sumatif digunakan untuk mengetahui efektivitas atau dampak pembelajaran dari produk media yang dikembangkan. Urut-urutan uji coba produk pada monograf ini mengikuti skema seperti ditunjukkan pada Gambar 39 dan Gambar 40.



Gambar 39.

Tahap Pengujian Produk
On Going



Gambar 40.

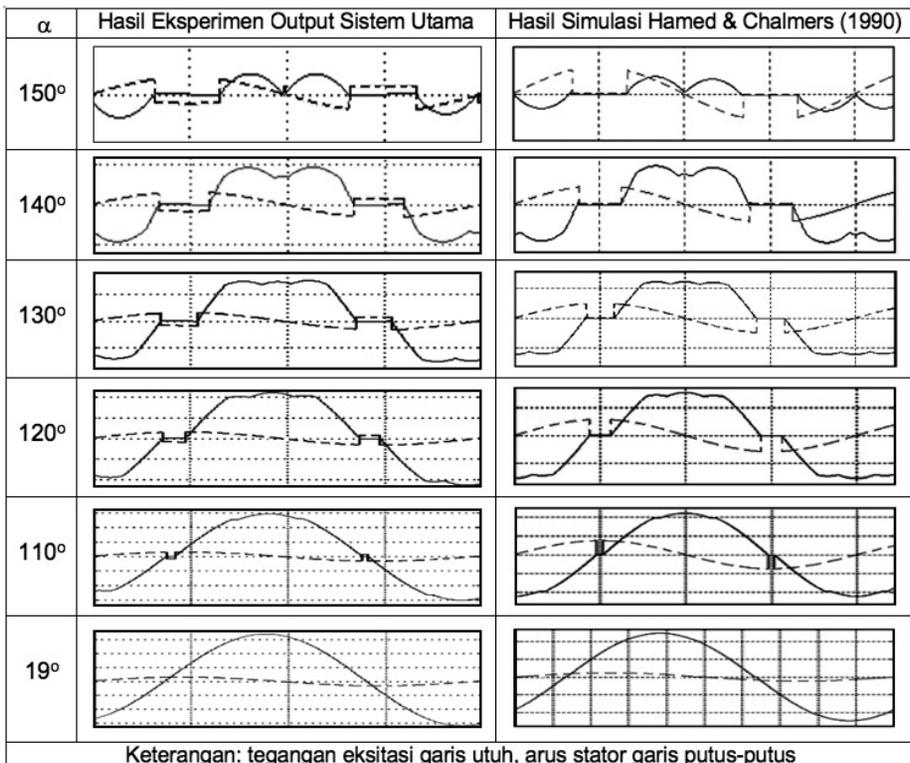
Tahap Pengujian Produk
Alpha Test, Beta Test, dan Sumatif

1. Uji Kinerja Sistem Utama Pengendali Tegangan Dengan *Thyristor*

Sistem kendali motor berkinerja tinggi yang dibangun ini menggunakan pengendali tegangan berbasis *thyristor* sebagai sistem utamanya. Sebelum sistem utama ini dilengkapi dengan sub sistem-sub sistem pendukungnya yakni *soft-starter* dan *stall detector*, perlu diuji terlebih dahulu kinerjanya. Untuk memastikan sistem utama yang dibangun telah bekerja dengan baik, perlu dilakukan pengujian berulang-ulang lewat evaluasi formatif *on going* tahap ke-1 oleh

pengembang. Proses evaluasi dapat dilakukan dengan membandingkan bentuk gelombang arus dan tegangan yang dihasilkan terhadap bentuk arus dan tegangan motor hasil penelitian Hamed dan Chalmers (1990), seperti telah dikemukakan dalam tinjauan pustaka di muka. Sistem kendali tegangan yang dibangun menggunakan *thyristor* terpicu ini dinyatakan telah berkerja dengan baik jika bentuk gelombang arus dan tegangan motor yang dihasilkan mirip dengan bentuk gelombang arus dan tegangan motor hasil penelitian terdahulu tersebut.

Hasil eksperimen simulatif menunjukkan bahwa sistem utama yang dibangun menggunakan pengendali tegangan berbasis *thyristor* seperti pada Gambar 30 di atas, dapat menampilkan fenomena seperti ditunjukkan pada Gambar 41 berikut ini.

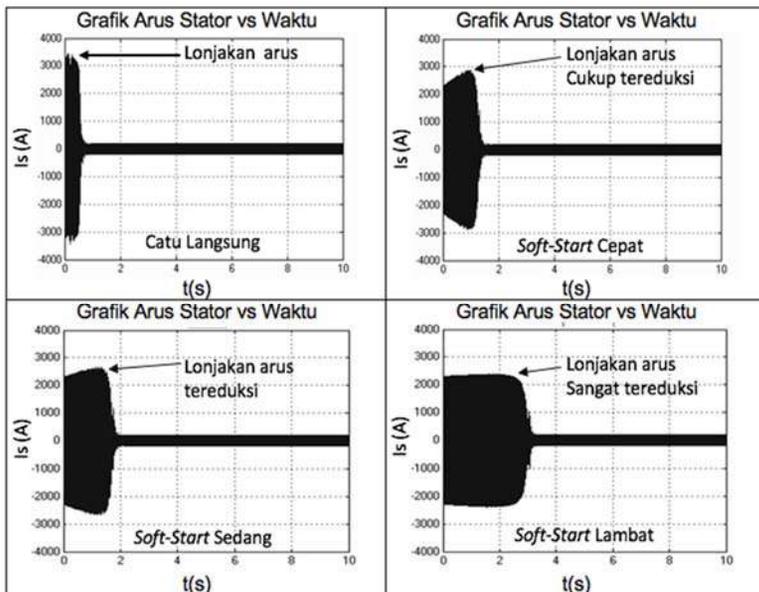


Gambar 41. Perbandingan Bentuk Gelombang **Tegangan Eksitasi** dan Arus Pada Sistem Utama Terhadap Hasil Simulasi Hamed & Chalmers (1990) Untuk Berbagai Sudut Pemicuan α

Berdasarkan Gambar 41 di atas, terlihat bahwa bentuk gelombang tegangan eksitasi dan arus stator dari sistem utama yang dibangun ini mirip dengan bentuk gelombang dan arus motor hasil simulasi Hamed dan Chalmers (1990). Hal ini mengindikasikan bahwa sistem utama yang dibangun yakni pengendali tegangan dengan menggunakan *thyristor* terpicu telah dapat bekerja dengan baik, sehingga dapat dilengkapi dengan unit-unit lainnya sebagai pendukung sistem kendali berkinerja tinggi.

2. Uji Kinerja *Soft-Starter*

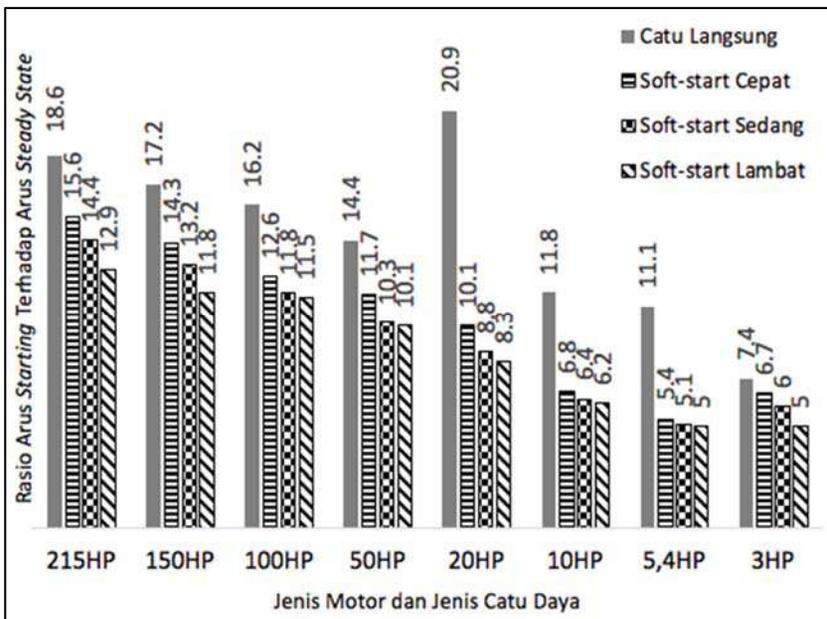
Setelah memperoleh kepastian bahwa sistem utama telah dapat bekerja dengan baik, selanjutnya dilakukan pemasangan unit *soft-starter*. Berdasarkan eksperimen simulatif, motor yang dikendalikan menggunakan sistem utama yang dipasangi unit *soft starter* memberikan karakteristik dinamis untuk arus stator motor 215HP seperti ditunjukkan pada Gambar 42 berikut ini.



Gambar 42.
Karakteristik Dinamis Arus Stator Motor 215 HP
untuk Berbagai Jenis Catu Daya

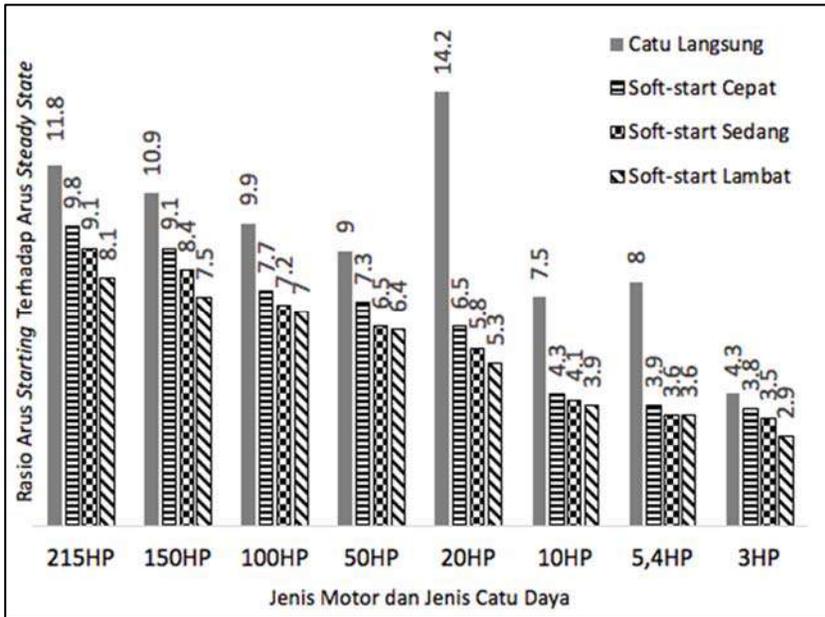
Secara visual, berdasarkan Gambar 42 di atas, terlihat bahwa karakteristik dinamis yang dihasilkan oleh sistem yang dibangun telah menunjukkan hasil yang mirip dengan hasil penelitian terdahulu khususnya dari Nithin, Jos & Rafeek (2013), Rafeek, *et al.* (2013), Jun, Yao & Xia-hui (2016), Muchlas (2016), dan Trivedi, *et al.* (2017) seperti telah diuraikan pada kajian pustaka di muka. Hal ini menunjukkan bahwa ditinjau dari bentuk kurva watak dinamis yang dihasilkan, sistem kendali *soft-start* ini telah menunjukkan kinerja yang baik.

Melalui Evaluasi Formatif *On Going* tahap ke-2 ini dapat diperoleh pula informasi bahwa arus *starting* yang dibangkitkan oleh motor induksi yang dioperasikan menggunakan catu daya langsung (*direct-on-line supplied*) terlihat nilainya sangat tinggi, namun nilai arus tersebut berkurang ketika sistem utama dijalankan dengan unit *soft-starter*, dan reduksinya semakin besar untuk kecepatan tegangan *ramp-up* yang semakin rendah (*soft-start* lambat) seperti ditunjukkan pada Gambar 43 dan Gambar 44.



Gambar 43.

Reduksi Arus *Starting* Oleh Unit *Soft-Starter* Untuk Beban Normal-1



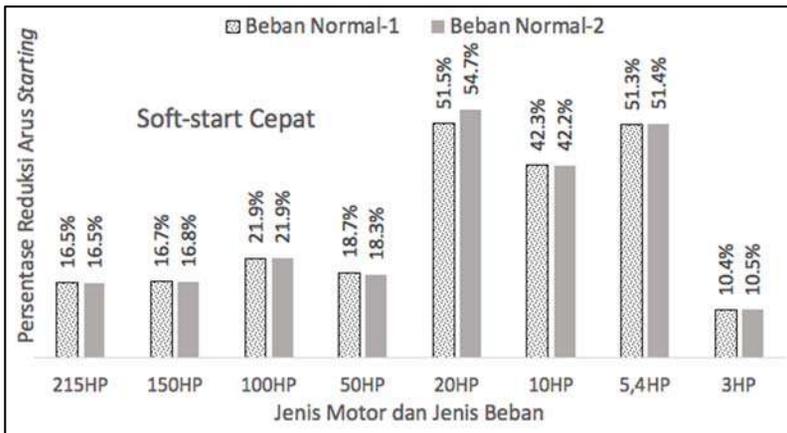
Gambar 44.

Reduksi Arus *Starting* Oleh Unit *Soft-Starter* Untuk Beban Normal-2

Merujuk Gambar 43 dan Gambar 44, terlihat bahwa motor yang dicatu secara langsung membangkitkan arus *starting* yang sangat tinggi dibandingkan arus *steady state*, baik untuk beban Normal-1 maupun Normal-2. Sebagai contoh, untuk motor jenis 215 HP dengan beban Normal-1, arus *starting* yang dibangkitkan oleh catu langsung sebesar 18,6 kali arus *steady state*. Pemasangan unit *soft-starter* telah memberikan penurunan arus *starting* saat mesin melakukan *start-up* untuk semua jenis catu *soft-start* (cepat, sedang dan lambat) pada semua jenis motor. Terlihat untuk motor 215 HP dengan beban Normal-1, catu *soft-start* jenis cepat, sedang dan lambat, berturut-turut mampu menurunkan arus *starting* dari 18,6 kali menjadi 15,6; 14,4; dan 12,9 kali arus *steady state*. Berdasarkan kedua gambar tersebut, terlihat pula bahwa semakin lambat catu *soft-start* yang diberikan, sistem kendali akan memberikan arus *starting* yang semakin rendah, dalam hal ini catu jenis *soft-start* lambat memberikan kinerja terbaik. Keadaan-keadaan tersebut telah menunjukkan bahwa dari sudut pandang kemampuan mereduksi

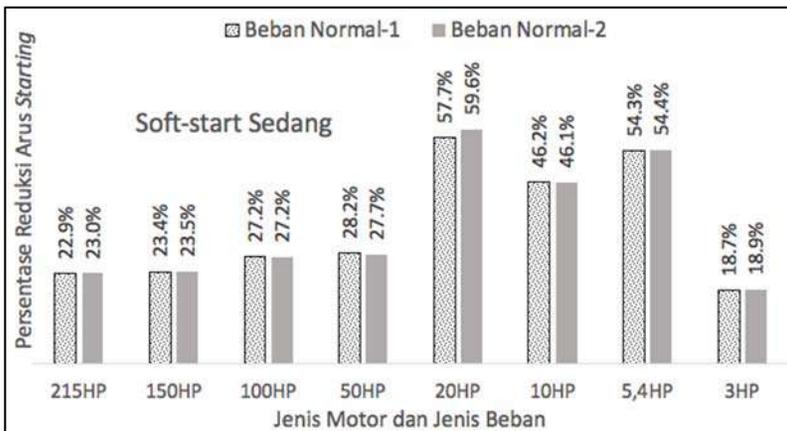
lonjakan arus *starting*, sistem kendali *soft-start* yang dibangun telah dapat memberikan kinerja yang sangat baik.

Melalui uji ini dapat ditunjukkan pula pengaruh pemberian beban terhadap kemampuan *soft-start* dalam mereduksi arus *starting* seperti ditunjukkan pada Gambar 45, Gambar 46, dan Gambar 47 berikut ini.



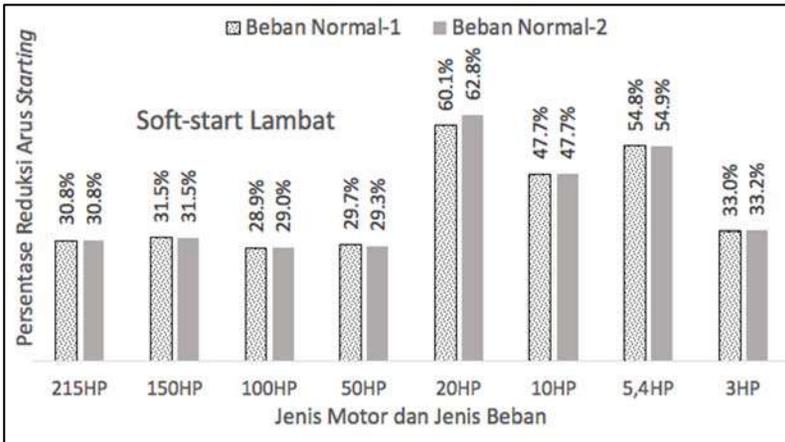
Gambar 45.

Pengaruh Beban Terhadap Persentase Reduksi Arus *Starting* untuk Catu *Soft-Start* Cepat



Gambar 46.

Pengaruh Beban Terhadap Persentase Reduksi Arus *Starting* untuk Catu *Soft-Start* Sedang

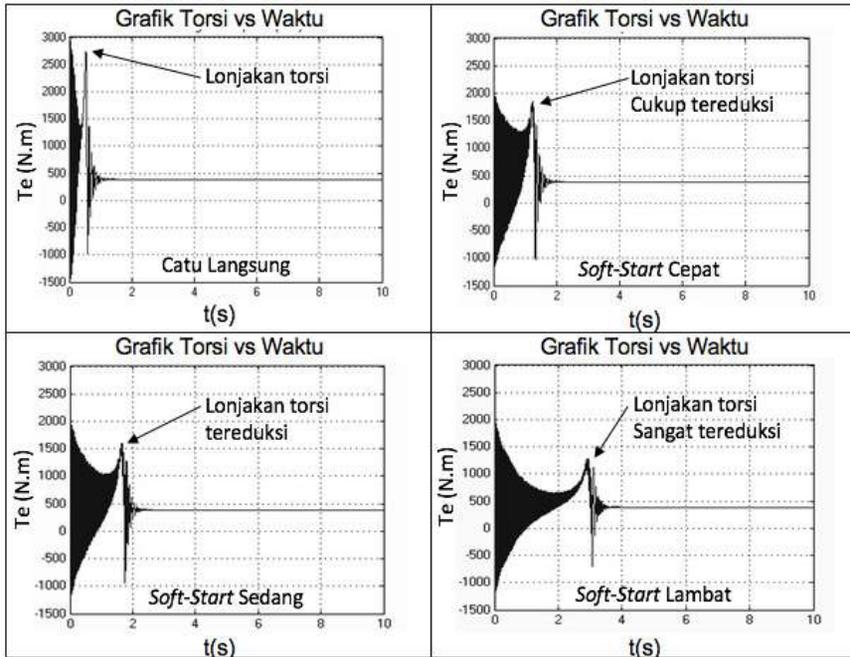


Gambar 47.

Pengaruh Beban Terhadap Persentase Reduksi Arus *Starting* untuk Catu *Soft-Start* Lambat

Jika Gambar 45, Gambar 46, dan Gambar 47 dicermati, akan terlihat panjang balok antara beban Normal-1 dengan beban Normal-2 untuk semua jenis motor dan jenis *soft-starter* nampak tidak berbeda, hal ini menunjukkan bahwa perubahan beban tidak berpengaruh terhadap tingkat reduksi arus *starting*. Oleh karena beban Normal-2 nilainya dua kali beban Normal-1, maka dapat dikatakan bahwa perubahan beban menjadi dua kalinya tetap memberikan kinerja sistem yang baik yakni tetap mampu memberikan tingkat reduksi yang sama.

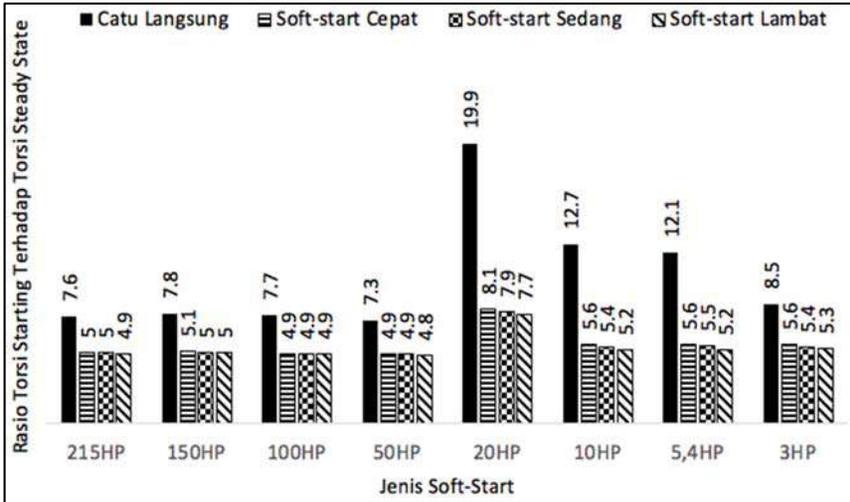
Selain ditinjau dari kemampuannya dalam mereduksi lonjakan arus *starting*, kinerja unit *soft-starter* juga dapat ditinjau dari kemampuannya dalam mereduksi lonjakan torsi elektromagnetik saat *start-up*. Melalui eksperimen simulatif, ditemukan pengaruh *soft-starter* terhadap reduksi torsi *starting* seperti ditunjukkan pada Gambar 48 berikut ini.



Gambar 48.

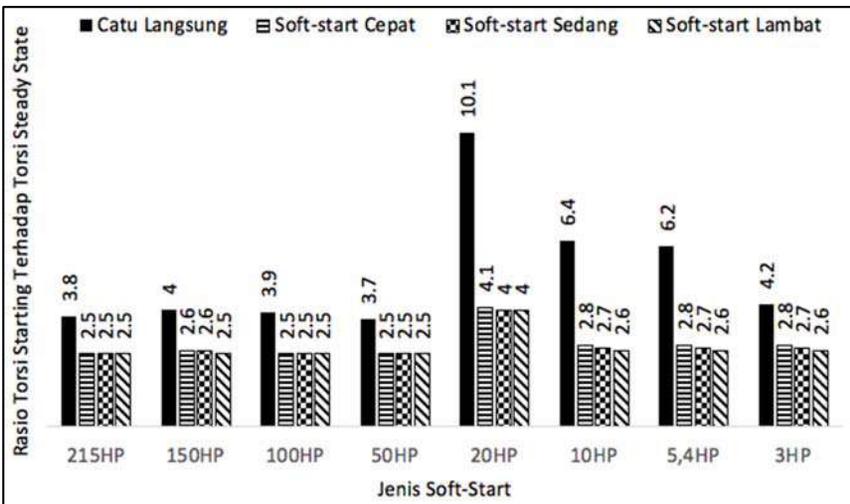
Karakteristik Dinamis Torsi Elektromagnetik Motor 215 HP untuk Berbagai Jenis Catu Daya

Merujuk Gambar 48, terlihat bahwa bentuk kurva karakteristik dinamis torsi elektromagnetik yang ditampilkan, mirip dengan kurva hasil penelitian terdahulu dari Nithin, Jos & Rafeek (2013), Rafeek, *et al.* (2013), Jun, Yao & Xia-hui (2016), Muchlas (2016), dan Trivedi, *et al.* (2017). Hal ini menunjukkan bahwa ditinjau dari bentuk kurva watak dinamis dari torsi elektromagnetik yang dihasilkan, sistem kendali *soft-start* ini telah menunjukkan kinerja yang baik. Selanjutnya, terlihat pula bahwa pemasangan unit *soft-starter* pada sistem utama telah memberikan dampak tereduksinya torsi *starting* dibandingkan dengan torsi dengan catu langsung. Secara lebih detail, untuk semua jenis motor yang diselidiki, pengaruh pemasangan unit *soft-starter* terhadap reduksi torsi elektromagnetik ditunjukkan pada Gambar 49 dan Gambar 50.



Gambar 49.

Reduksi Lonjakan Torsi *Starting* Oleh Unit *Soft-Starter*
 untuk Beban Normal-1



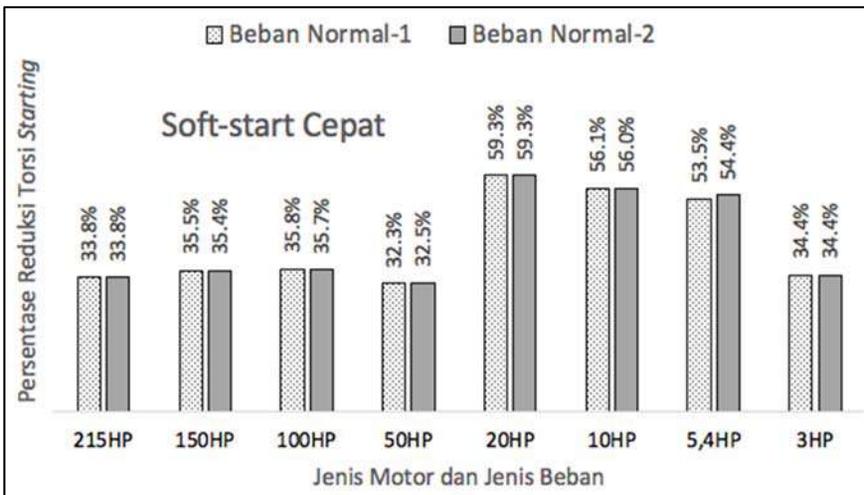
Gambar 50.

Reduksi Lonjakan Torsi *Starting* Oleh Unit *Soft-Starter*
 untuk Beban Normal-2

Merujuk Gambar 49 dan Gambar 50, terlihat bahwa torsi *starting* yang dibangkitkan oleh motor yang dicatu secara langsung (blok

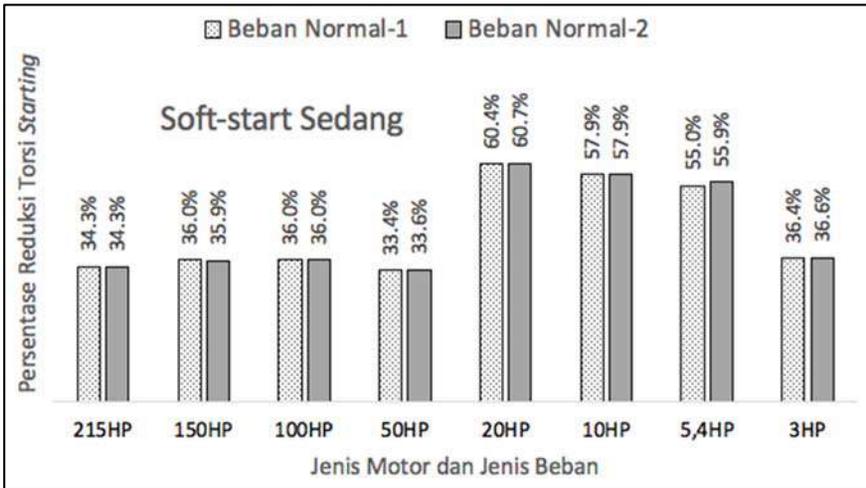
berwarna hitam) melonjak dengan nilai yang sangat tinggi. Sebagai contoh untuk beban Normal-1 pada motor jenis 215 HP dan 150 HP (Gambar 49), lonjakan torsi *starting* berturut-turut mencapai 7,6 dan 7,8 kalinya torsi normal saat *steady state*, bahkan untuk motor jenis 20 HP lonjakannya mencapai 19,9 (hampir 20) kalinya torsi normal. Melalui Gambar 49 dan 50, terlihat pula bahwa penggunaan sistem kendali *soft-start* telah mampu mereduksi lonjakan torsi *starting* untuk semua jenis *soft-starter* pada semua jenis motor yang digunakan sebagai sampel dalam kajian ini. Lonjakan torsi *starting* (blok berwarna hitam) telah dapat direduksi dengan cukup signifikan menjadi torsi *starting* yang lebih rendah melalui sistem kendali *soft-start* berkecepatan tinggi, sedang, dan lambat. Melalui Gambar 49 dan Gambar 50, ternyata kecepatan *soft-start* tidak mempengaruhi perubahan rasio reduksi torsi *starting*.

Pengaruh pemberian beban terhadap persentase reduksi torsi *starting* untuk berbagai jenis motor dan catu *soft-start* ditunjukkan melalui Gambar 51, Gambar 52, dan Gambar 53.



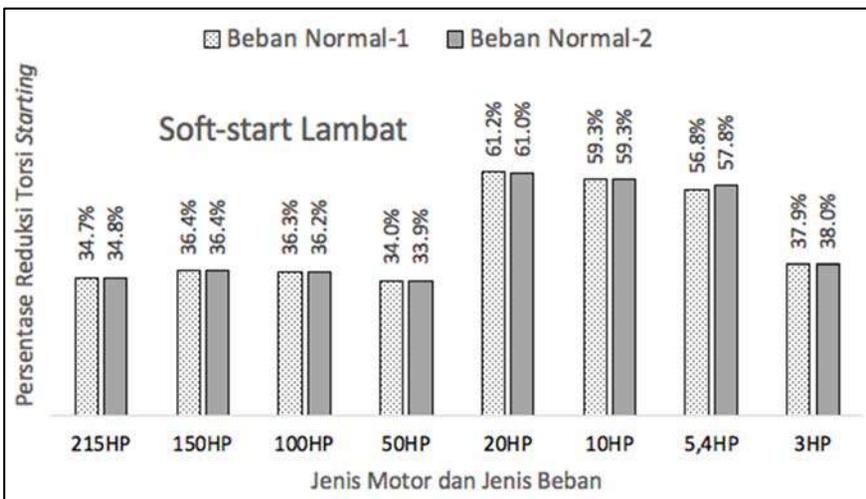
Gambar 51.

Pengaruh Beban Terhadap Persentase Reduksi Torsi *Starting*
Untuk Catu *Soft-Start* Cepat



Gambar 52.

Pengaruh Beban Terhadap Persentase Reduksi Torsi *Starting*
 Untuk Catu *Soft-Start* Sedang



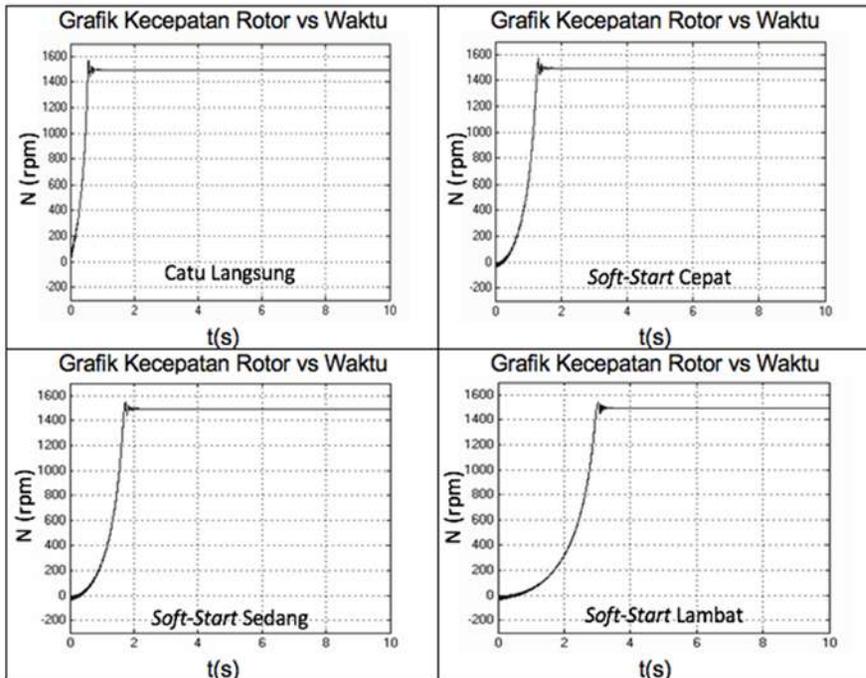
Gambar 53.

Pengaruh Beban Terhadap Persentase Reduksi Torsi *Starting*
 Untuk Catu *Soft-Start* Lambat

Dari Gambar 51, Gambar 52, dan Gambar 53 dapat diperoleh informasi bahwa pemberian beban tidak berpengaruh terhadap persentase reduksi torsi *starting* oleh sistem kendali *soft-start*. Hal ini

ditunjukkan oleh ketinggian yang hampir sama antara persentase reduksi pada beban Normal-1 dan beban Normal-2 untuk semua jenis kecepatan *soft-start* dan semua jenis motor yang diuji. Keadaan ini dapat ditafsirkan bahwa sistem kendali yang dibangun telah dapat melakukan reduksi lonjakan torsi saat *start-up* untuk semua nilai beban normal.

Selain diukur kemampuannya dalam mereduksi lonjakan arus dan torsi *starting*, sistem kendali yang dibangun juga dilihat kemampuannya dalam membangkitkan kecepatan putar rotor yang diperlukan. Melalui eksperimen dapat diperoleh watak dinamis kecepatan putar motor seperti ditunjukkan pada Gambar 54 berikut ini.

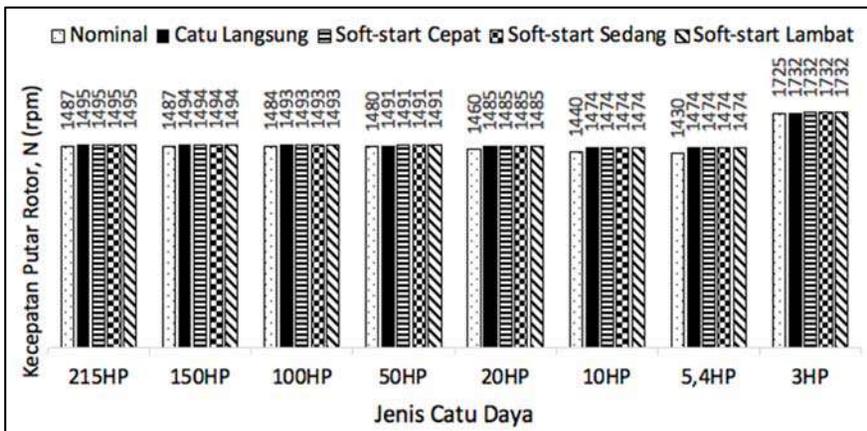


Gambar 54.

Karakteristik Dinamis Kecepatan Rotor Motor 215 HP untuk Berbagai Jenis Catu Daya

Dari gambar 54 terlihat bahwa bentuk kurva karakteristik dinamis kecepatan rotor yang dihasilkan dari eksperimen mirip dengan bentuk

kurva laporan Nithin, Jos & Rafeek (2013), Rafeek, *et al.* (2013), Jun, Yao & Xia-hui (2016), Muchlas (2016), dan Trivedi, *et al.* (2017). Hal ini mengindikasikan bahwa dari tinjauan visualisasi kecepatan rotornya, unit *soft-starter* yang disematkan pada sistem utama telah dapat bekerja dengan baik. Berdasarkan eksperimen juga diperoleh informasi nilai kecepatan rotor saat *steady-state* untuk semua jenis catu daya dan semua jenis motor seperti ditunjukkan pada Gambar 55.



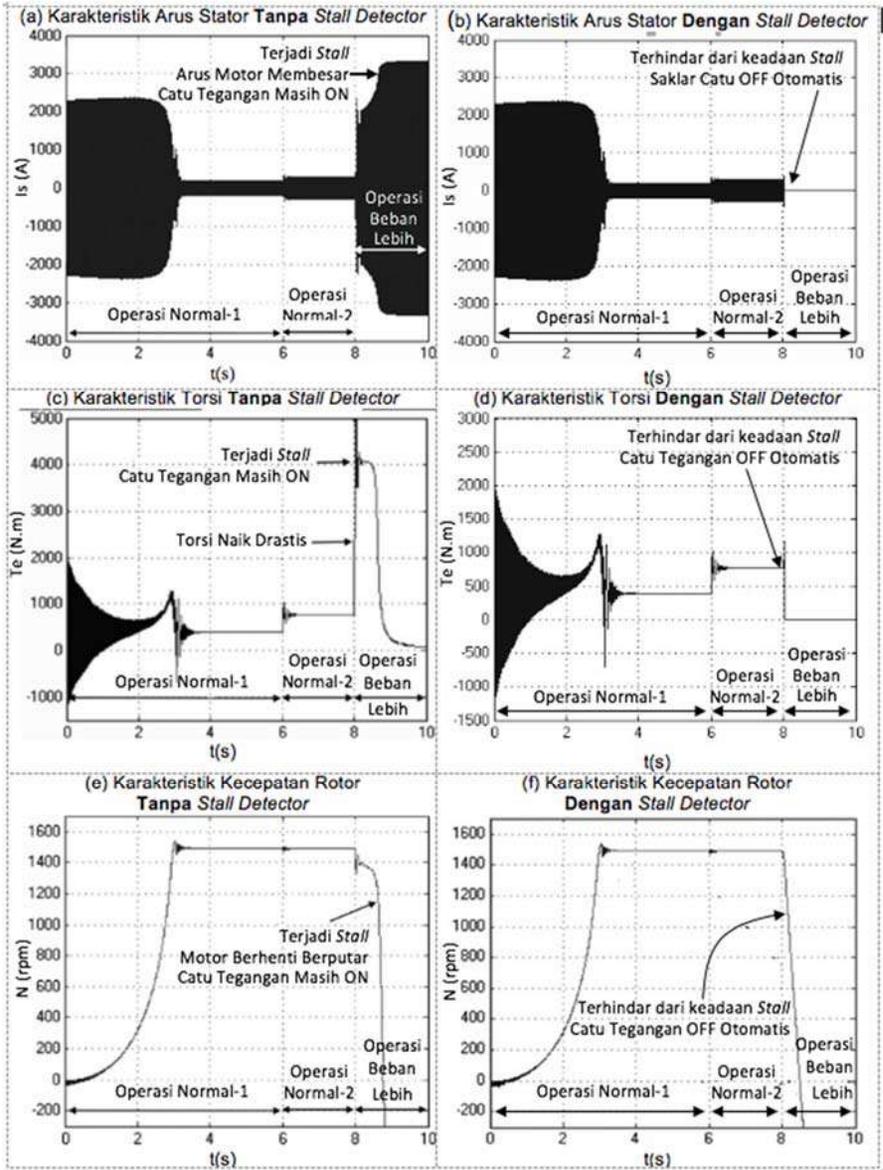
Gambar 55.

Kecepatan Putar Rotor Pada Berbagai Mode Catu Daya

Berdasarkan Gambar 55, dapat diperoleh informasi bahwa untuk semua jenis motor, kecepatan putar rotor relatif sama nilainya mendekati nilai nominalnya pada berbagai mode catu yang diberikan. Hal ini mengandung makna bahwa sistem kendali *soft-start* yang dibangun mampu mengendalikan motor sehingga selain dapat melakukan aksi pereduksian arus dan torsi *starting*, juga mampu membangkitkan kecepatan putar rotor yang diperlukan. Berdasarkan hasil uji secara keseluruhan pada evaluasi formatif *on going* tahap ke-2 ini, telah dapat disimpulkan bahwa sistem kendali *soft-start* yang dibangun memiliki kinerja yang sangat baik.

3. Uji Kinerja Detektor *Stall*

Selain *soft-starter*, sub sistem lain yang dipasang pada sistem utama pengendali tegangan adalah sub sistem detektor *stall*. Unit ini diuji kinerjanya melalui evaluasi formatif *on going* tahap ke-3 dengan mengamati konektivitas sistem terhadap tegangan catu tiga fase. Detektor *stall* dinyatakan dapat berkerja dengan baik jika pada saat tertentu ketika motor terkena beban lebih, sehingga torsi elektromagnetik atau arus statornya meningkat sampai batas ambang yang telah ditentukan, sistem dapat mematikan/memutus catu daya secara otomatis yang ditunjukkan oleh berubahnya nilai arus dan tegangan motor menjadi bernilai nol yang dapat diamati melalui *display* output. Berdasarkan data-data yang diperoleh melalui eksperimen, dapat dilakukan analisis perbandingan karakteristik dinamis motor induksi yang dihasilkan oleh sistem kendali *soft-start* sebelum dan sesudah dipasang unit *stall detector*. Gambar 56 berikut ini merupakan analisis keadaan karakteristik motor induksi berdaya tinggi 215 HP, sebelum dan sesudah sistem dipasang *stall detector* untuk jenis catu daya *soft-start* lambat.



Gambar 56.

Analisis Perbandingan Karakteristik Motor Untuk Sistem Kendali *Soft-Start* Sebelum dan Sesudah Dipasangi *Stall Detector*

Dari Gambar 56 (a) dan Gambar 56 (c), terlihat bahwa untuk operasi beban lebih pada sistem yang belum dipasang *stall detector*, terjadi kenaikan arus stator dan torsi elektromagnetik sehingga melebihi batas

ambang keamanan motor, menyebabkan motor mengalami keadaan *stall*. Keadaan *stall* ini ditunjukkan oleh menurunnya secara drastis kecepatan putar rotor, seperti ditunjukkan pada Gambar 56 (e), sehingga motor menjadi berhenti berputar sementara catu tegangan masih terpasang yang ditunjukkan oleh masih munculnya arus stator seperti pada Gambar 56 (a). Dari analisis ini dapat diperoleh kesimpulan bahwa sistem kendali yang belum dipasang unit *stall detector*, pemberian beban lebih dapat menyebabkan motor mengalami *stall*, yakni motor berhenti berputar tetapi catu tegangan masih terpasang (ON) pada inputnya.

Sementara itu, pada Gambar 56 (b) atau sebelah kanan, terlihat bahwa motor induksi yang dikendalikan oleh sistem kendali *soft-start* yang dilengkapi dengan *stall detector*, pada saat menerima beban lebih arus statornya menunjukkan nilai nol yang berarti tidak ada arus yang mengalir pada belitan statornya. Hal ini mengindikasikan bahwa *stall detector* yang terpasang pada sistem telah bekerja mendeteksi arus lebih akibat pemberian beban lebih, dan ketika arus tersebut melebihi batas ambangnya maka catu daya akan dimatikan sehingga tampak arusnya menjadi nol (Gambar 56b), motor tidak lagi membangkitkan torsi (Gambar 56d) dan motor berhenti berputar (Gambar 56f) bersamaan dengan matinya catu daya sehingga motor menjadi aman. Untuk semua jenis motor, berdasarkan eksperimen dapat disajikan data perbedaan antara arus stator dengan beban normal dan beban lebih tanpa detektor *stall* serta beban lebih dengan detektor *stall* seperti pada Tabel 12 berikut ini.

Tabel 12. Perbandingan Arus Stator Beban Normal dan Beban Lebih Untuk Sistem Pengendali Setelah Dipasangi *Stall Detector*

| Jenis Motor | Arus RMS Stator (A) | | | |
|-------------|---------------------|----------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| | Beban Normal-1 | Beban Normal-2 | Beban Lebih Tanpa Detektor Stall | Beban Lebih dengan Detektor Stall |
| 215 HP | 131 | 207 | 2356 | 0 |
| 150 HP | 97 | 152 | 1598 | 0 |
| 100 HP | 71 | 115 | 1081 | 0 |
| 50 HP | 38 | 61 | 503 | 0 |
| 20 HP | 15 | 23 | 350 | 0 |
| 10 HP | 7,8 | 12,3 | 113 | 0 |
| 5,4 HP | 5 | 7 | 59,4 | 0 |
| 3 HP | 9 | 18 | 57,6 | 0 |

Dari Tabel 12 terlihat bahwa untuk setiap jenis motor, pemberian beban lebih tanpa rangkaian detektor stall, setelah motor berjalan pada beban normal, akan menyebabkan arus stator naik tinggi sekali. Namun, jika detektor *stall* dipasang pada sistem utama, pemberian beban lebih menyebabkan arus stator menjadi 0. Hal ini menunjukkan bahwa unit *stall detector* telah bekerja dengan sangat baik, dalam arti mampu mematikan catu daya atau sumber tegangan ketika terjadi beban lebih yang berpotensi menjadikan motor dalam keadaan *stall*.

Keseluruhan hasil uji kinerja melalui evaluasi formatif *on going* tahap ke-3 ini telah menunjukkan bahwa unit *stall detector* yang dipasang pada sistem kendali utama telah mampu memberikan kinerja yang tinggi, sebagai unit yang secara otomatis dapat mematikan catu tegangan apabila motor memiliki potensi *stall* karena beban lebih. Penggabungan unit *stall detector* ini dan unit *soft-starter* ke dalam unit pengendali utama telah menjadikan sistem yang dibangun dapat berperan secara terpadu sebagai sistem kendali motor induksi berkinerja tinggi.

4. *Alpha Testing*

Selain ketiga uji kinerja di atas, dalam monograf ini dilakukan juga *alpha testing* perangkat pembelajaran oleh ahli materi, instruksional dan media. Tujuan uji ini selain untuk memperoleh informasi kelayakan produk perangkat pembelajaran yang dikembangkan dalam tinjauan para ahli, juga dimaksudkan untuk memperoleh masukan-masukan guna perbaikan/revisi dan penghalusan produk yang dihasilkan. Sesuai saran Surjono (2017: 78-83), kajian dalam monograf ini menggunakan kriteria uji kelayakan produk dalam tiga aspek yakni isi, instruksional dan tampilan. Atas dasar aspek isi, kelayakan produk akan ditinjau dari indikator-indikator:

- a. kesesuaian materi dengan tujuan pembelajaran;
- b. kebenaran struktur materi;
- c. keakuratan isi materi;
- d. kebenaran tata bahasa;
- e. kebenaran ejaan;
- f. kebenaran istilah;
- g. kebenaran tanda baca;
- h. kebenaran tentang informasi tingkat kesulitan pengguna; dan
- i. ketergantungan materi dengan budaya atau etnik.

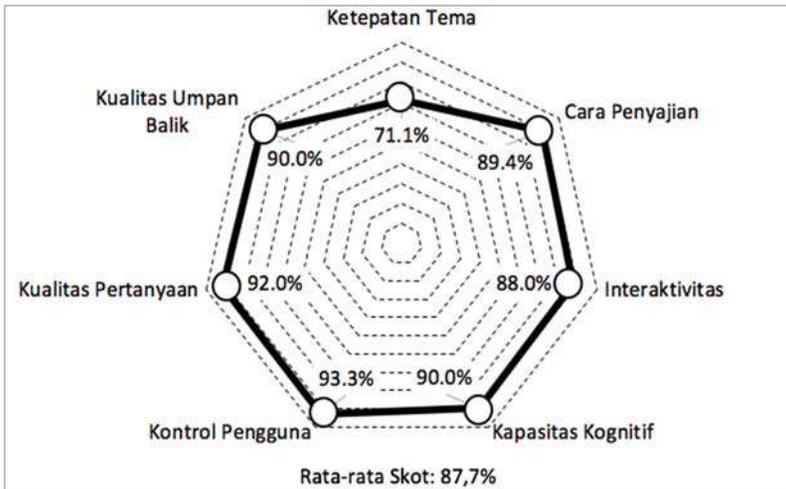
Dari aspek instruksional, kelayakan produk ditinjau berdasarkan indikator-indikator:

- a. ketepatan tema;
- b. cara penyajian;
- c. interaktivitas;
- d. kapasitas kognitif;
- e. strategi pembelajaran;
- f. kontrol pengguna;
- g. kualitas pertanyaan; dan
- h. kualitas umpan balik.

Sedangkan indikator-indikator yang digunakan untuk aspek tampilan meliputi:

- a. tata letak;
- b. penggunaan warna;
- c. kualitas teks (ukuran, jenis *font*, warna);
- d. kualitas gambar (resolusi, relevansi dengan materi);
- e. kualitas animasi (resolusi, relevansi dengan materi);
- f. kualitas audio/video (resolusi, relevansi dengan materi);
- g. fungsi navigasi;
- h. konsistensi navigasi;
- i. kekontrasan latar belakang dengan objek depan; dan
- j. spasi.

Subjek uji coba ini adalah dosen-dosen yang memiliki kompetensi keahlian dalam bidang pedagogi teknik elektro, khususnya sub bidang mesin-mesin listrik/elektronika daya, ahli instruksional dan ahli media. Instrumennya berbentuk angket pertanyaan tertutup untuk penilaian validitas produk dengan aspek dan indikator-indikator seperti dijelaskan di atas, dan angket pertanyaan terbuka untuk saran-saran perbaikan produk seperti tersaji pada Lampiran 1 sampai dengan Lampiran 3. Data-data tentang uji validitas produk bersifat kuantitatif, dan dianalisis dengan teknik persentase. Produk dipandang valid oleh para ahli jika setiap aspek memberikan persentase skor validitas di atas 80%. Berdasarkan pengumpulan data melalui angket, diperoleh hasil seperti ditunjukkan pada Gambar 57.



Gambar 57.

Kelayakan Produk Oleh Ahli Instruksional/Materi/Media Untuk Aspek Instruksional

Merujuk gambar 57 di atas, terlihat bahwa para ahli memberikan penilaian yang sangat baik terhadap aspek instruksional dari produk yang dikembangkan dengan rata-rata skor sebesar 87,7%, lebih besar dibandingkan batas skor minimal sebesar 80%. Dalam hal ini, produk telah dipandang sebagai perangkat pembelajaran yang memiliki tema sesuai dengan karakter mahasiswa pembacanya, relevan dengan teori yang diberikan pada perkuliahan, dan dapat mendukung pencapaian tujuan pembelajaran matakuliah Mesin Listrik, Instalasi Listrik, dan Sistem Proteksi. Selain itu, produk dipandang memiliki cara penyajian yang sangat baik ditunjukkan oleh kemampuannya menyediakan panel-panel simulator yang mempermudah penggunaannya dalam: (1) melakukan *setting* parameter; (2) mengenal bagian-bagian dari sistem yang dipelajari; (3) menjalankannya; dan (4) membaca outputnya. Hasil ini mengindikasikan pula bahwa perangkat pembelajaran yang dihasilkan, menyediakan buku panduan simulator dan panduan praktik yang mudah dipelajari, menarik minat dan perhatian mahasiswa, serta dapat meningkatkan keterampilan penggunaan produk simulator dan

keterampilan praktik.

Produk juga dipandang memiliki interaktivitas yang tinggi ditunjukkan oleh kemampuannya dalam:

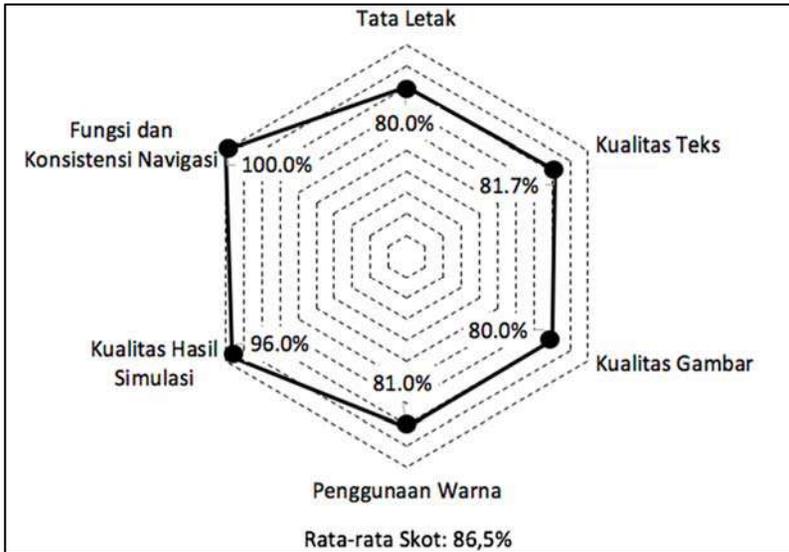
- a. mendorong mahasiswa untuk belajar aktif saling bekerjasama dalam kelompok;
- b. menciptakan lingkungan belajar yang lebih menarik dibandingkan praktik dengan alat-alat real;
- c. memotivasi penggunaanya, dan
- d. menciptakan komunikasi timbal balik yang tinggi antara pengguna dengan komputer.

Dari sub aspek kapasitas kognitif, temuan pada uji coba ini menunjukkan bahwa produk mampu mengalokasi kapasitas pengingatan penggunaanya secara wajar yang ditunjukkan oleh: (1) sistem yang dipelajari ditampilkan bagian per bagian sehingga unit-unitnya mudah dikenali, diingat dan dipahami fungsinya; dan (2) buku panduan pengoperasian maupun panduan praktik juga disusun dengan pendekatan penyajian bagian per bagian sehingga mudah diingat dan dipelajari. Para ahli juga memandang bahwa perangkat pembelajaran ini telah menyediakan kelengkapan kontrol pengguna yang memungkinkan dapat mengarahkan penggunaanya untuk belajar mandiri, menyediakan pertanyaan-pertanyaan tugas dengan kualitas yang baik, dan memiliki fasilitas umpan balik yang baik.

Terdapat hal menarik dari hasil analisis uji kelayakan aspek instruksional ini yakni salah satu sub aspeknya (Ketepatan Tema) memiliki skor 71,1% di bawah batas minimum kelayakan 80%. Hal ini terjadi karena para ahli memandang bahwa mata kuliah relevan dengan tema yang dicantumkan pada spesifikasi produk hanya satu saja yakni Sistem Proteksi, sedangkan menurut para ahli terdapat mata kuliah lain yang relevan dengan tema yakni Instalasi Listrik dan Mesin Listrik khususnya pada bagian pengendalian motor induksi. Sekalipun skornya di bawah batas minimum kelayakan, para ahli memandang bahwa dari

sudut pandang ketepatan tema produk ini menjadi sangat layak setelah pada spesifikasi produk dilakukan revisi dengan mencantumkan mata kuliah relevan ditambah dengan Mesin Listrik dan Instalasi Listrik.

Selanjutnya, berdasarkan data angket, dapat disajikan pula grafik seperti pada gambar 58 berikut ini yang merupakan hasil evaluasi produk oleh ahli pada aspek tampilan produk.



Gambar 58.

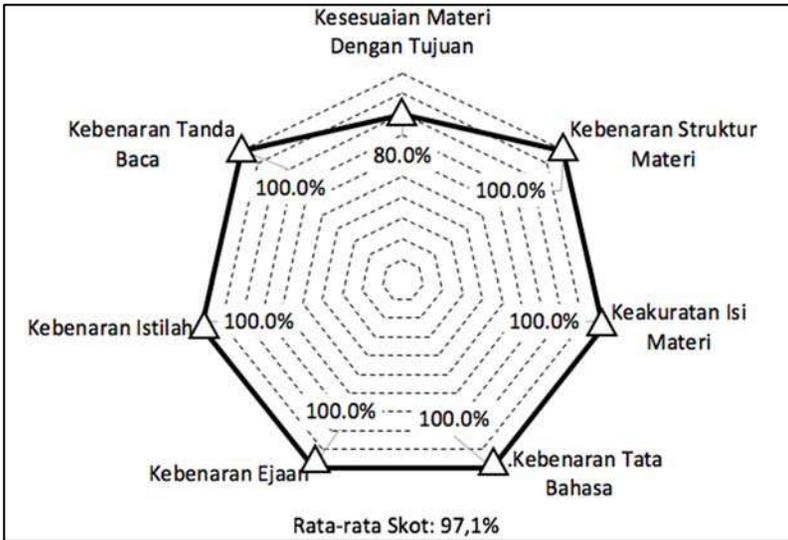
Hasil Evaluasi Produk Oleh Ahli Untuk Aspek Tampilan Produk

Berdasarkan gambar 58, terlihat bahwa para ahli memberikan penilaian yang sangat baik terhadap aspek tampilan produk dengan rata-rata skor penilaian sebesar 86.5%, melampaui batas persentase skor minimum sebesar 80%. Hal ini berarti produk perangkat pembelajaran yang dibangun telah memberikan tampilan yang baik. Para ahli berpandangan bahwa tata letak komponen pada simulator, maupun tata letak gambar-gambar dan teks pada panduan pengoperasian sistem dan panduan praktik sudah serasi dan tidak terlalu padat. Kualitas teks yang meliputi jenis huruf, ukuran huruf, dan warna huruf yang digunakan pada simulator maupun panduan-panduan yang menyertai produk

perangkat pembelajaran ini juga dipandang telah tepat, sesuai, proporsional dan mudah dibaca. Hasil uji kelayakan ini menunjukkan pula bahwa para ahli berpendapat produk memiliki kualitas gambar yang sangat baik didukung oleh penggunaan resolusi sangat memadai dan kontras yang cukup sehingga semua gambar pada simulator maupun buku panduan mudah dan enak dilihat. Penggunaan warna khususnya pada simulator, juga dinilai sudah sesuai oleh para ahli karena dengan komposisi warna yang tersedia, tampilan produk dapat mempermudah dalam *setting* parameter simulator, membedakan jenis panel dan membaca hasil output simulasi.

Temuan lain yang penting pada uji kelayakan ini adalah para ahli memiliki persepsi bahwa hasil simulasi dari produk yang dikembangkan ini memiliki kualitas yang sangat baik. Hal ini didukung oleh kenyataan bahwa tampilan grafik hasil simulasi: (1) relevan dengan materi praktik; (2) mendukung pemahaman mahasiswa terhadap materi Sistem Kendali Motor Berkinerja Tinggi; (3) skalanya mudah diatur; dan (4) mudah dibaca. Simulator yang dihasilkan dari pengembangan ini dinilai oleh para ahli sebagai produk yang menyediakan tombol-tombol navigasi yang bersifat *user friendly* dan konsisten sehingga mudah dikenali dan dioperasikan.

Memperhatikan berbagai pandangan para ahli terhadap penampilan produk pada uji ini, dapat dinyatakan bahwa produk perangkat pembelajaran yang dihasilkan dipandang layak dari aspek tampilannya. Selanjutnya, kelayakan produk juga ditinjau dari aspek isi. Berdasarkan data dari angket, dapat digambarkan hasil evaluasi ahli terhadap produk media pada aspek isi seperti ditunjukkan pada Gambar 59.



Gambar 59. Hasil Evaluasi Produk Oleh Ahli Untuk Aspek Isi

Merujuk Gambar 59, terlihat bahwa produk perangkat pembelajaran ini dinilai sangat baik dari aspek isi oleh para ahli. Hal ini ditunjukkan oleh skor rata-rata pandangan ahli sebesar 97,1% jauh melampaui batas minimal skor kelayakan yakni 80%. Para ahli memandang bahwa seluruh materi yang terkandung dalam produk ini telah sesuai dengan kompetensi dasar yang harus dicapai oleh mahasiswa, tingkat pendidikan pengguna, dan tujuan pembelajaran praktik Sistem Kendali Motor Induksi Berkinerja Tinggi. Selain itu, para ahli juga berpendapat bahwa struktur materi dalam perangkat pembelajaran ini telah sesuai dengan kaidah bidang ilmu teknik elektro. Para ahli memandang seluruh materi dan istilah yang terkandung dalam perangkat pembelajaran ini akurat dan tidak ada yang salah. Dari sisi tata bahasa, produk ini dinilai para ahli memiliki uraian materi yang mengacu pada kaidah tata Bahasa Indonesia yang baik dan benar, menggunakan kalimat yang efektif, dan disampaikan menggunakan bahasa yang menarik dan lazim dalam komunikasi tulis bahasa Indonesia.

Uji ini juga menemukan informasi bahwa para ahli menganggap naskah pada semua buku panduan yang menyertai produk ini telah

disusun menggunakan ejaan dan tanda baca yang benar sesuai kaidah Ejaan Yang Disempurnakan (EYD), dan istilah-istilah umum yang digunakan pada uraian materi telah sesuai dengan istilah baku dalam Kamus Besar Bahasa Indonesia. Selanjutnya, para ahli juga menilai bahwa produk ini telah menggunakan istilah-istilah teknis yang lazim digunakan di lingkungan bidang ilmu teknik elektro. Penggunaan istilah, simbol dan/atau notasi yang menggambarkan suatu konsep pada perangkat pembelajaran ini, juga dinilai para ahli telah dilakukan secara konsisten pada setiap bagian dari uraian materi.

Atas dasar hasil uji kelayakan produk oleh ahli materi/ instruksional/ media yang meliputi aspek instruksional, tampilan produk dan isi, seperti telah dilakukan di atas, dapat disimpulkan bahwa produk ini layak digunakan sebagai perangkat pembelajaran praktik Sistem Kendali Motor Induksi Berkinerja Tinggi di lingkungan program studi Teknik Elektro. Melalui *alpha testing* ini para ahli memberikan saran-saran perbaikan terhadap media yang dikembangkan antara lain: (1) perlu ditambahkan pada spesifikasi produk nama mata kuliah Instalasi Listrik sebagai materi yang relevan dengan tema perangkat pembelajaran; (2) desain kegiatan mandiri perlu lebih ditonjolkan; (3) perlu ditambahkan kegiatan pra praktik berupa pelatihan penggunaan simulator agar mahasiswa lebih mengenal unit-unit yang ada pada simulator; (4) unit-unit yang membutuhkan pengaturan dibuat *zooming*; dan (5) perlu dibuat warna yang sama untuk unit-unit yang memiliki fungsi yang sama seperti Ramp1 dan Ramp2.

5. *Beta Testing*

Uji ini merupakan evaluasi menyeluruh dan dianggap sebagai uji terakhir sebelum produk digunakan secara luas. *Beta testing* dilaksanakan oleh mahasiswa calon pengguna produk ini pada akhir evaluasi formatif yang ditujukan untuk memperoleh masukan-masukan dari calon pengguna tersebut. Dalam uji ini, subjek penelitian diminta menjalankan produk dari awal sampai akhir dengan teliti dan diminta

untuk mendokumentasikan atau mencatat semua kelemahan-kelemahan produk yang ditemukan. Subjek juga diminta mencatat hal-hal yang dirasakan seperti rasa senang, bosan, dan bingung yang timbul pada diri subjek saat menjalankan produk. Setelah uji ini berakhir, dilakukan wawancara untuk mengeksplorasi pandangan-pandangan, kritik dan saran-saran dari subjek terhadap produk yang telah digunakan untuk dipertimbangkan sebagai masukan pada revisi akhir produk.

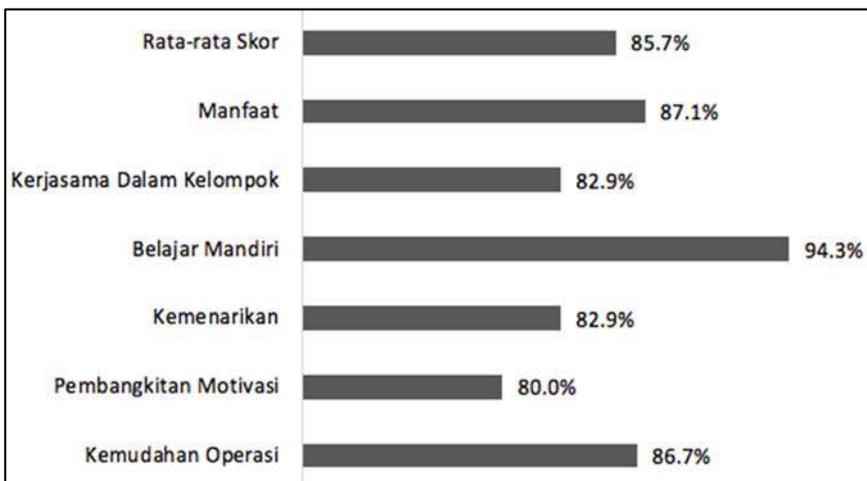
Melalui *beta testing* diperoleh saran-saran perbaikan dari subjek penelitian antara lain perlunya memberi warna yang sama untuk blok motor induksi tiga fase dan blok sumber tegangan tiga fase, agar pengguna tidak merasa bingung dan cepat dalam mengidentifikasi blok sistem utama pada panel simulator. Selain itu, calon pengguna juga memberikan saran agar tampilan *default* dari grafik output karakteristik dinamis perlu diperbesar (*zoom in*). Saran ini tidak diimplementasikan karena fungsi *zoom in* telah tersedia pada tampilan grafik output, sehingga setelah simulasi dilakukan pengguna dapat melakukan pengaturan ukuran grafik output secara fleksibel. Gabungan saran antara para ahli dan calon pengguna tentang tata letak simulator telah ditindaklanjuti dengan melakukan revisi produk yang dikembangkan.

6. Evaluasi Sumatif

Evaluasi ini menurut saran Surjono (2017) idealnya dilakukan dengan menggunakan empat level Kirkpatrick yakni level *reactions*, *learning*, *behaviour* dan *results*. Namun, atas dasar pertimbangan teknis, monograf ini hanya menggunakan evaluasi sumatif untuk satu level saja yakni *reactions* khususnya persepsi kepuasan subjek terhadap penggunaan produk dari aspek materi, instruksional dan tampilan. Subjek ujicoba ini adalah mahasiswa program studi teknik elektro Universitas Ahmad Dahlan yang pernah menempuh mata kuliah Mesin Listrik dan dosen serta guru SMK bidang studi teknik elektro. Pada ujicoba ini, subjek diminta menjalankan prosedur praktik untuk menyelidiki karakteristik motor induksi tiga fase yang dikendalikan oleh

sistem kendali berkinerja tinggi menggunakan simulator yang dikembangkan. Untuk menggali data persepsi terhadap penggunaan produk ini, digunakan instrumen kuesioner. Teknik analisis data yang digunakan adalah persentase dengan kriteria, simulator dinyatakan bermanfaat jika persepsi subjek memberikan skor di atas 60%.

Sesuai dengan data-data yang diperoleh melalui evaluasi sumatif, dapat divisualisasikan grafik respons calon pengguna produk seperti tersaji pada Gambar 60.



Gambar 60. Respons Calon Pengguna Produk

Merujuk Gambar 60, terlihat bahwa calon pengguna produk memberikan persepsi yang sangat baik terhadap produk ini dengan ditunjukkan oleh persentase rata-rata skor persepsi sebesar 85,7%. Hal ini menunjukkan bahwa calon pengguna merasa mudah dalam mengoperasikan perangkat pembelajaran simulator sistem kendali motor induksi berkinerja tinggi.

Melalui evaluasi ini ditemukan pula bahwa calon pengguna merasa senang dalam menggunakan perangkat pembelajaran karena penggunaan produk dapat lebih membangkitkan motivasi saat digunakan dan lebih menarik dibandingkan jika praktik dilaksanakan dengan peralatan real. Dalam pandangan calon pengguna, produk ini

juga menyediakan kelengkapan-kelengkapan yang memungkinkan penggunanya dapat melakukan belajar secara mandiri. Selain itu, calon pengguna merasakan bahwa produk ini dalam penggunaannya mampu menciptakan lingkungan belajar kolaboratif. Pada akhirnya, calon pengguna memandang bahwa produk yang dihasilkan ini memberikan manfaat yang besar karena dapat meningkatkan keterampilan menggunakan simulator dan sekaligus meningkatkan keterampilan dalam melaksanakan praktik. Dengan memperhatikan persepsi calon pengguna seperti diuraikan di atas, dapat diambil kesimpulan bahwa produk ini dapat diterima oleh calon pengguna sebagai perangkat pembelajaran yang layak digunakan, karena produk memiliki karakteristik mudah dioperasikan, menarik, membangkitkan motivasi, menciptakan lingkungan belajar mandiri dan kolaboratif serta bermanfaat meningkatkan pemahaman terhadap materi sistem kendali motor berkinerja tinggi. Calon pengguna memberikan persepsi yang positif terhadap produk ini dengan rata-rata persentase persepsi sebesar 85,7%.

VI | PENUTUP

Berdasarkan kajian maupun hasil pengembangan dan pembahasan yang telah dikemukakan di muka, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Kondisi di lapangan tempat penelitian menunjukkan bahwa media yang dibutuhkan untuk mendukung perkuliahan/praktikum Mesin-mesin Listrik dan Sistem Proteksi khususnya materi sistem kendali berkinerja tinggi motor induksi tiga fase belum tersedia.
2. Memperhatikan aspek efisiensi biaya, fleksibilitas dan kenyamanan penggunaan, media yang tepat untuk dikembangkan di lapangan tempat penelitian adalah jenis simulator berbasis SIMULINK dari MATLAB yang dapat menirukan watak motor induksi tiga fase dan dikendalikan oleh sistem kendali berkinerja tinggi dengan pengendali tegangan menggunakan *thyristor*.
3. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, rumusan tujuan pembelajaran Mesin-mesin Listrik dan Sistem Proteksi, terkait dengan media yang dikembangkan adalah mahasiswa dapat memahami karakteristik, cara kerja dan cara pengendalian motor AC/induksi termasuk pengendalian untuk peningkatan kinerja mesin dengan sistem proteksi *soft-starter* dan detektor *stall* terpasang di dalamnya.
4. Melalui langkah analisis, dihasilkan rumusan keterampilan teknis yang diharapkan dapat ditumbuhkan melalui penerapan media yang dikembangkan, yakni mahasiswa terampil dalam:
 - a. menggambar diagram blok sistem kendali motor induksi berkinerja tinggi yang dilengkapi dengan unit proteksi;
 - b. merangkai pengendali tegangan dengan *thyristor* untuk motor induksi tiga fase;

- c. melakukan *setting-up* urutan pulsa pemicuan *thyristor* yang benar pada pengendali tegangan motor induksi tiga fase;
 - d. melakukan eksperimen untuk menentukan sudut pemicuan minimum pada pengendali tegangan menggunakan *thyristor*;
 - e. menginstalasi dan mengoperasikan dengan benar motor induksi tiga fase yang dilengkapi unit proteksi *soft-starter* dan detektor *stall*;
 - f. melakukan pengukuran besaran-besaran motor induksi menggunakan instrumen listrik tiga fase dan *storage oscilloscope*;
 - g. melakukan eksperimen untuk menentukan karakteristik motor induksi tiga fase yang dikendalikan oleh unit *soft-starter* dan *stall detector*; dan
 - h. mengatur kecepatan *soft-start* yang tepat untuk jenis motor tertentu.
5. Berdasarkan analisis dan eksplorasi pustaka, telah dapat dirancang spesifikasi dan model konseptual dari media/perangkat pembelajaran yang dikembangkan, meliputi informasi tentang Perangkat Keras, Perangkat Lunak, Panel, Model Motor, Model Sistem Kendali, Mode Tegangan Catu, Skenario Operasi, dan Aspek Pedagogi. Produk yang dihasilkan dalam kajian ini dapat dioperasikan menggunakan perangkat keras komputer *desktop* atau *laptop* dengan spesifikasi frekuensi *clock* prosesor minimal 1,8 GHz, kapasitas memori internal 2GB, kapasitas *harddisk* minimal 500 GB, resolusi monitor 1366 x 768 dpi, yang di dalamnya terpasang sistem operasi dari keluarga *Windows* dan program MATLAB versi 7.
6. Melalui kajian ini telah dapat dihasilkan produk media/perangkat pembelajaran berupa perangkat lunak Simulator Sistem Kendali Motor Induksi Berkinerja Tinggi yang dapat dijalankan di bawah kontrol program SIMULINK dari MATLAB. Simulator yang dihasilkan dilengkapi dengan buku panduan pengoperasian dan buku panduan praktik. Sistem kendali yang digunakan dalam

simulator mengandung unit *soft-starter* dan *stall detector*. Simulator menyediakan panel berupa:

- a. saklar Pemilih Skenario: Operasi Beban Normal dan Beban Lebih;
 - b. Pemilih Mode Catu Daya: Langsung, *Soft Start* Cepat, *Soft Start* Sedang, dan *Soft Start* Lambat; dan
 - c. *display* output untuk arus stator dan rotor, torsi elektromagnetik, kecepatan putar rotor, tegangan fase, dan pulsa pemicu dalam fungsi waktu.
7. Unit *soft-start* yang dikembangkan memiliki kinerja yang sangat baik. Untuk semua jenis motor yang diuji, unit ini mampu melakukan reduksi arus dan torsi *starting* secara signifikan. Kecepatan *soft-start* berpengaruh terhadap perubahan rasio reduksi arus *starting*, semakin lambat catu *soft-start* yang diberikan, sistem kendali akan memberikan tingkat reduksi arus *starting* yang semakin tinggi. Kecepatan *soft-start* tidak berpengaruh terhadap perubahan rasio reduksi torsi *starting*.
 8. Unit *stall detector* yang dikembangkan memiliki kinerja yang sangat baik. Untuk semua jenis catu daya dan jenis motor yang diuji, unit ini mampu mematikan secara otomatis catu daya motor jika terjadi keadaan *stall*.
 9. Secara keseluruhan sistem kendali motor induksi berkinerja tinggi yang dibangun telah menunjukkan kinerja yang sangat baik, ditunjukkan oleh kemampuannya dalam mereduksi secara signifikan arus dan torsi *starting*, serta kemampuannya dalam mematikan secara otomatis catu daya ketika motor mengalami keadaan *stall*.
 10. Menurut pandangan ahli instruksional/materi/media, produk yang dihasilkan melalui kajian ini layak digunakan sebagai perangkat pembelajaran praktik Sistem Kendali Motor Induksi Berkinerja Tinggi. Para ahli memberikan persepsi yang positif terhadap produk pembelajaran ini dengan skor 87,7% untuk aspek instruksional, 86,5% untuk aspek tampilan produk dan 97,1% untuk aspek isi.

11. Calon pengguna memberi tanggapan yang positif terhadap produk dalam kajian ini yang ditunjukkan oleh skor rata-rata persepsi sebesar 85,7%. Produk ini dipersepsikan oleh calon pengguna memiliki karakteristik mudah dioperasikan, menarik, membangkitkan motivasi, menciptakan lingkungan belajar mandiri dan kolaboratif serta bermanfaat meningkatkan pemahaman terhadap materi sistem kendali motor berkinerja tinggi.
12. Menurut pandangan ahli instruksional/materi/media dan calon pengguna, seluruh panel/tombol navigasi dari produk perangkat pembelajaran yang dihasilkan ini telah berfungsi dengan baik, mudah dioperasikan, dan interaktif.

Walaupun melalui kajian ini telah dapat diperoleh sebuah produk yang layak digunakan sebagai perangkat pembelajaran, namun masih terdapat beberapa kelemahan yang perlu diperbaiki untuk pengembangan selanjutnya. Oleh sebab itu perlu diberikan rekomendasi sebagai berikut.

1. Praktik menggunakan simulator hasil dari kajian ini memerlukan pra syarat yakni mahasiswa harus terampil terlebih dahulu menggunakan simulator. Untuk itu, penyelenggara praktik sistem kendali motor induksi berkinerja tinggi ini perlu memberikan bekal keterampilan yang cukup terlebih dahulu kepada peserta praktik, agar saat praktik dilaksanakan peserta telah terampil mengoperasikan simulator.
2. Simulator yang telah dikembangkan ini juga telah terbukti dapat membangkitkan motivasi dan minat, meningkatkan pengetahuan dan keterampilan, serta meningkatkan kenyamanan belajar subjek dalam mempelajari sistem kendali motor berkinerja tinggi, sehingga disarankan kepada para dosen teknik elektro yang mengampu mata kuliah Mesin Listrik, Instalasi Listrik dan Sistem Proteksi untuk menggunakan simulator ini tidak hanya sebagai perangkat praktik, tetapi juga sebagai perangkat pembelajaran di kelas menjadi media demonstrasi ataupun perangkat untuk tugas-tugas mandiri.

3. Oleh karena pada kajian ini belum dilakukan uji dampak pembelajaran, riset berikutnya disarankan melakukan evaluasi tersebut agar dapat diketahui dampak pembelajaran dari penggunaan produk yang dihasilkan ini.
4. Mengingat simulator yang dihasilkan melalui kajian ini ternyata hanya dapat berjalan di bawah kendali SIMULINK dari Matlab Versi 7 tahun 2006, maka untuk kajian berikutnya disarankan mengembangkan simulator yang sesuai dengan *platform* Matlab versi yang lebih baru.

DAFTAR PUSTAKA

- Alessi, S. M., & Trollip, S. R. (2001). *Multimedia for learning: Methods and development*. Boston: Allyn and Bacon.
- Babich, A., & Mavrommatis, K. (2004). Virtual laboratory concept for engineering education. In *International Conference on Engineering Education and Research "Progress Through Partnership"* (pp. 1043–1050). Ostrava, Czech Republic: Technical University of Ostrava.
- Bailey, C., & Freeman, M. J. (2010). A java bread-board simulator: Digital circuit simulation with an open-source toolset. *IADIS International Journal on Computer Science and Information System*, 55(1), 13–25.
- Barata, P. N. A., Filho, M. R., & Nunes, M. V. A. (2015). Consolidating learning in power systems: virtual reality applied to the study of the operation of electric power transformers. *IEEE Transactions on Education*, 58(4), 255–261.
- Borse, C., Pandhare, A., & Kumar, R. (2015). PLC based induction motor starting and protection. *International Journal of Engineering Research and General Science Volume*, 3(2), 893–897.
- Branch, R. M., & Deissler, C. H. (2008). Processes. In A. Januszewski & M. Molenda (Eds.), *Educational Technology: A Definition with Commentary* (pp. 195–211). New York: Taylor & Francis Group, LLC.
- Brown, J., Bull, J., & Pendlebury, M. (1997). *Assessing student learning in higher education*. New York: Routledge.
- Budhu, M. (2002). Virtual laboratories for engineering education. In *International Conference on Engineering Education*. Manchester, UK.

- Candelas, F. A., Torres, F., Gil, P., Puente, S., & Pomares, J. (2006). Including the virtual laboratory concept in an on-line collaborative environment. In *7th IFAC Symposium on Advances in Control Education*. Escuela Politécnica Superior de Ingenieros Industriales, Spanyol.
- Colace, F., Santo, M. De, & Pietrosanto, A. (2004). Work in progress - virtual lab for electronic engineering curricula. *34th Annual Frontiers in Education, 2004. FIE 2004.*, 22–24.
- Corter, J. E., Nickerson, J. V, Im, S., & Ma, J. (2007). Constructing reality: A study of remote, hands-on, and simulated laboratories. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 14(2), 1–27.
- Dewan, S. B., Slemon, G. R., & Straughen, A. (1984). *Power Semiconductor Drives*. Toronto: John Wiley & Sons.
- Eaton Corporation. (2013). Choosing between a soft starter and a variable frequency drive to your application. *Industry Application IA04003002E*, 1–4.
- Goodwin, G. C., Medioli, A. M., Sher, W., Vlacic, L. B., & Welsh, J. S. (2011). Emulation-based virtual laboratories: a low-cost alternative to physical experiments in control engineering education. *IEEE Transactions on Education*, 54 (1), 48–55.
- Hamed, S. A., & Chalmers, B. J. (1990). Analysis of variable-voltage thyristor controlled induction motors. *IEE Proceedings*, 137 (3), 184–193.
- Jun, T., Yao, L., & Xia-hui, W. (2016). Research and Design of High Torque Soft Starter Based on Discrete Frequency Tong Jun. In F. Zhang & X. Lin (Eds.), *6th International Conference on Information Engineering for Mechanics and Materials (ICIMM 2016)* (pp. 150–156). Paris, France: Atlantic Press.

- Kantzavelou, I. (2005). A virtual lab model for an introductory computer. *Facta Universitatis (Nis), Ser.: Elec. Energ.*, 18 (2), 263–274.
- Khan, S., Jaffery, M. H., Hanif, A., & Asif, M. R. (2017). Teaching tool for a control systems laboratory using a quadrotor as a plant in matlab. *IEEE Transactions on Education*, 60 (4), 249–256.
- Krivickas, R. V., & Krivickas, J. (2006). Laboratory instruction in engineering education. *Global Journal of Engineering Education*, 11 (2), 191–196.
- Lang, D., Mengelkamp, C., Jager, R. S., Geoffroy, D., & Billaud, M. (2004). Pedagogical evaluation of remote laboratories in eMerge project Authors: In *International Conference on Engineering Education*.
- Lin, P. I. H., & Lin, M. (2005). Design and implementation of an internet-based virtual lab system for elearning support. In *the 5th IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT)* (pp. 295–296). Kaohsiung, Taiwan.
- Ma, J., & Nickerson, J. V. (2006). Hands-on, simulated, and remote laboratories: A comparative literature review. *ACM Computing Surveys*, 38 (3), 1–24.
- Mackay, W. (2004). Compressor induction motor stall and rotation detection using microcontrollers. *Application Note AN2149 Freescale Semiconductor, Inc.*, 1–36.
- Martinez-Roman, J., Perez-Cruz, J., Pineda-Sanchez, M., Puche-Panadero, R., Roger-Folch, J., Riera-Guasp, M., & Sapena-Bano, A. (2015). Electrical machines laminations magnetic properties: A virtual instrument laboratory. *IEEE Transactions on Education*, 58 (3), 159–166.

- Mateev, V., Todorova, S., & Smrikarov, A. (2007). Test system in digital logic design virtual laboratory-tasks delivery. In *International Conference on Computer Systems and Technologies-CompSysTech'07* (pp. 1–6). Rousse, Bulgaria.
- MD-Nasir, A. ., Ali, D. F., Noordin, M. K., & Nordin, M. S. (2011). Technical skills and non-technical skills: predefinition concept. In *Proceedings of the IETEC'11 Conference*. Kuala Lumpur, Malaysia.
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2003). *Power Electronics: Converters, Applications and Design* (Third Edit). Hoboken, Nj: John Wiley & Sons, Inc.
- Molenda, M., & Boling, E. (2008). Creating. In A. Januszewsk & M. Molenda (Eds.), *Educational Technology: A Definition with Commentary* (pp. 81–139). New York: Taylor & Francis Group, LLC.
- Muchlas. (1998). *Sistem kendali soft-start motor induksi tiga fase berbasis mikrokontroler*. Tesis S2 Teknik Elektro Universitas Gadjah Mada. Tidak diterbitkan.
- Muchlas. (2015). Developing a teaching model using an online collaboration approach for a digital technique practical work. *The Turkish Online Journal of Educational Technology*, 14 (3), 63–69.
- Muchlas. (2016). *Pengembangan simulator berbasis Matlab untuk pembelajaran praktik karakteristik motor induksi tiga fase*. Laporan penelitian tidak diterbitkan. Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta.
- Muchlas. (2017). *Pengembangan Sistem Kendali Motor Induksi Berkinerja Tinggi Menggunakan Unit Soft Starter dan Stall Detector Berbasis SIMULINK Dalam Tinjauan Pedagogi*. Laporan penelitian tidak diterbitkan. Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta..

- Muchlas. (2018). Developing an online learning media using smartphone for the electrical machinery course. *TOJET: The Turkish Online Journal of Educational Technology*, 17 (1), 62–68.
- Nithin, K. S., Jos, B. M., & Rafeek, M. (2013). An improved method for starting of induction motor with reduced transient torque pulsations. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2 (1), 462–470.
- ON-Semiconductor. (2015, August). AMIS-30623/AMIS-30624/NCV70627 stall detection. *Application Note AND8471/D*, 1–30.
- Padmapriyadharishini, R. (2015). Improved soft start capability of induction motor using solar power generation based z source inverter. *International Journal of MC Square Scientific Research*, 7 (1), 66–76.
- Padmapriyadharishini, R., N, K. I., & Ramakrishnan, V. (2016). Comparison of pi and fuzzy based vector control and soft start capability by adding sl-zsi with photovoltaic for induction motor drive. *International Journal of Computer Technology and Applications*, 9 (31), 273–289.
- Rafeek, M., Jose, B. M., Nithin, K. S., & Paul, B. (2013). A novel soft starter for three-phase induction motors with reduced starting current and minimized torque pulsations. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 2 (8), 210–213.
- Rahman, M. F., Patterson, D., Cheok, A., & Betz, R. (2011). Motor drives. In M. H. Rashid (Ed.), *Power electronics handbook* (3rd ed., pp. 915–991). Burlington, MA: Elsevier Inc.
- Raphael, R., & PR, B. (2013). Fault detection of Induction Motor using Envelope Analysis. *International Journal of Advancements in Research & Technology*, 2 (7), 258–262.

- Rockwell Automation. (2014). When to use a soft starter or an ac variable frequency drive. *Rockwell Automation Publication 150-WP007A-EN-P*, 1–22.
- Ryu, D., Jeon, H., & Shon, J. (2016). Implementation of soft-starter with large scale power stack for high voltage induction motor driving. *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 65P (2), 88–93.
- Saleh, K. F., Mohamed, A. M., & Madkour, H. (2009). Developing virtual laboratories environments for engineering education. *International Journal of Arts and Sciences*, 3 (1), 9–17.
- Shahnia, F., Moghbel, M., & Yengejeh, H. H. (2016). Motivating power system protection course students by practical and computer-based activities. *IEEE Transactions on Education*, 59 (2), 81–90.
- Shokri, A., & Faraahi, A. (2010). Designing of virtual laboratories based on extended event driving simulation method. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 68, 1357–1359.
- Singh, V., Gupta, A., Gupta, A., Garg, A., Khandelwal, A., & Gupta, A. (2017). Induction motor protection system. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*, 3 (3), 714–716.
- Smith, K. C. A., & Alley, R. E. (1992). *Electrical Circuits: An Introduction*. Cambridge, USA: the Press Syndicate of the University of Cambridge.
- STMicroelectronics. (2013, December). L9942 back emf stall detection algorithm. *Application Note AN3327*, 1–22.
- Surjono, H. D. (2017). *Multimedia Pembelajaran Interaktif Konsep dan Pengembangan* (Edisi Pert). Yogyakarta: UNY Press.

- Thompson, C. (2016). The top 10 skills that will be in demand by all employers by 2020. *Business Insider*, 1. Retrieved from <http://www.businessinsider.com/wef-report-skills-workers-need-2016-1/?IR=T/#9-negotiation-skills-will-still-be-in-demand-2>
- Trivedi, B., Raval, J., Desai, J., & Sonwane, K. (2017). Soft start of induction motor using TRIAC switching. *International Journal of Engineering Development and Research*, 5(2), 1635–1639.
- Tzafestas, C. S., Palaiologou, N., & Alifragis, M. (2006). Virtual and remote robotic laboratory: Comparative experimental evaluation. *IEEE Transactions on Education*, 49 (3), 360–369.
- Unsworth, P. J. (1988). US4767975 A. United State Patent.
- Wolf, T. (2010). Assessing student learning in a virtual laboratory environment. *IEEE Transactions on Education*, 53 (2), 216–222.
- Yan, Y., & Wang, H. H. (2013). An asynchronous motor soft-starter with discrete variable frequency technology. *Applied Mechanics and Materials*, 263–266 (Information Technology Applications in Industry), 686–690.

LAMPIRAN

Lampiran 1

INSTRUMEN EVALUASI ASPEK INSTRUKSIONAL PERANGKAT PEMBELAJARAN SISTEM KENDALI MOTOR INDUKSI BERKINERJA TINGGI

Petunjuk:

1. Pengisian angket dilakukan dengan cara (1) memberi tanda silang (X) pada pilihan persepsi yang tersedia di setiap komponen.
2. Komentar/saran dapat diberikan pada setiap sub aspek.

Kriteria pilihan persepsi:

1. Sangat tidak setuju
2. Tidak setuju
3. Ragu-ragu
4. Setuju
5. Sangat setuju

| Sub Aspek | Kriteria | Pilihan Persepsi | | | | | Komentar/ Saran |
|-----------|---|------------------|---|---|---|---|--------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Tampilan tema pada disain simulator sudah sesuai dengan karakteristik mahasiswa | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Tampilan tema pada disain simulator relevan dengan materi Sistem Kendali Motor Induksi Berkinerja Tinggi | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Disain Simulator mendukung pencapaian tujuan praktik Sistem Kendali Motor Induksi Berkinerja Tinggi | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Tampilan tema pada buku panduan pengoperasian simulator sudah sesuai dengan karakteristik mahasiswa | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |

| | | | | | | |
|----------------|---|---|---|---|---|---|
| Ketepatan Tema | Tampilan tema pada buku panduan pengoperasian simulator relevan dengan materi Sistem Kendali Motor Induksi Berkinerja Tinggi | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Tampilan tema pada buku panduan pengoperasian simulator mendukung pencapaian tujuan praktik Sistem Kendali Motor Induksi Berkinerja Tinggi | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Tampilan tema pada buku panduan praktik sudah sesuai dengan karakteristik mahasiswa | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Tampilan tema pada buku panduan praktik relevan dengan materi Sistem Kendali Motor Induksi Berkinerja Tinggi | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Tampilan tema pada buku panduan praktik mendukung pencapaian tujuan pembelajaran praktik Sistem Kendali Motor Induksi Berkinerja Tinggi | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Cara Penyajian | Penyajian panel-panel yang tersedia mempermudah mahasiswa dalam melakukan <i>setting</i> parameter simulator | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Penyajian panel-panel yang tersedia mempermudah mahasiswa dalam mengenal bagian-bagian simulator | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Penyajian panel-panel yang tersedia mempermudah mahasiswa dalam menjalankan simulator | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Penyajian <i>display</i> output simulator mempermudah mahasiswa dalam memahami karakteristik dinamis motor induksi yang dikendalikan dengan sistem kendali berkinerja tinggi | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Penggunaan simulator mempermudah pencapaian tujuan belajar | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Penyajian materi pada buku panduan pengoperasian simulator dilakukan secara sistematis sehingga mudah dipahami | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Uraian materi pada buku panduan pengoperasian simulator mencerminkan hubungan yang erat antar topik | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Penyajian materi pada buku panduan pengoperasian simulator dilakukan secara bertahap dari mudah ke arah yang sulit, dari sederhana ke arah yang lebih rumit, atau dari bersifat konkrit ke abstrak | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

| | | | | | | | |
|----------------|---|---|---|---|---|---|--|
| | Penyajian materi pada buku panduan pengoperasian simulator sesuai dengan karakteristik mahasiswa | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Penyajian materi pada buku panduan pengoperasian simulator menarik minat dan perhatian mahasiswa | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Penyajian materi pada buku panduan pengoperasian simulator dapat meningkatkan keterampilan mahasiswa dalam mengoperasikan Simulator | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Penyajian materi pada buku panduan praktik dilakukan secara sistematis sehingga mudah dipahami | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Uraian materi pada buku panduan praktik mencerminkan hubungan yang erat antar topik | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Penyajian materi pada buku panduan praktik dilakukan secara bertahap dari mudah ke arah yang sulit, dari sederhana ke arah yang lebih rumit, atau dari bersifat konkrit ke abstrak | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Penyajian materi pada buku panduan praktik sesuai dengan karakteristik mahasiswa | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Penyajian materi pada buku panduan praktik menarik minat dan perhatian mahasiswa | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Penyajian materi pada buku panduan praktik dapat meningkatkan keterampilan mahasiswa dalam mengoperasikan Simulator | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Interaktivitas | Perangkat pembelajaran ini mampu mendorong mahasiswa untuk belajar aktif saling bekerjasama dalam kelompok | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Mengikuti praktik dengan menggunakan simulator ini lebih menarik dibandingkan praktek menggunakan laboratorium real | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Praktik menggunakan simulator dapat lebih meningkatkan motivasi mahasiswa dari pada praktik menggunakan peralatan real | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Simulator mampu menciptakan interaksi yang tinggi antara pengguna dengan komputer | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Perangkat pembelajaran ini menyediakan panduan yang dapat membantu pengguna mempermudah dalam mengoperasikan simulator | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Desain simulator terdiri atas unit-unit yang mudah dikenali dan diingat | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |

| | | | | | | |
|----------------------|---|---|---|---|---|---|
| Kapasitas Kognitif | Panel-panel simulator untuk <i>setting</i> parameter mudah dikenali dan diingat | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Unit input pada simulator (Pemilih Skenario dan Pemilih Mode Catu Daya) menggunakan komponen yang sederhana sehingga mudah diingat dan dioperasikan | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Unit output pada simulator menggunakan display yang mudah diingat dan ditampilkan | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Materi dalam buku panduan pengoperasian simulator disajikan bagian per bagian sehingga mudah dipelajari dan diingat | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Setiap bagian materi dari buku panduan pengoperasian simulator disajikan secara sederhana sehingga mempermudah pengguna dalam mengoperasikan simulator | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Materi dalam buku panduan praktik disajikan bagian per bagian sehingga mudah dipelajari dan diingat | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Setiap bagian materi dari buku panduan praktik disajikan secara sederhana sehingga mudah diingat | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Kontrol Pengguna | Simulator dapat mengarahkan penggunanya untuk belajar mandiri | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Penyajian materi pada buku panduan pengoperasian simulator dapat mengarahkan penggunanya untuk belajar mandiri | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Penyajian materi pada buku panduan praktik dapat mengarahkan penggunanya untuk belajar mandiri | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Kualitas Pertanyaan | Perangkat pembelajaran ini menyediakan soal-soal yang sesuai dengan tujuan praktik | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Soal-soal yang disajikan dapat memperkuat penguasaan materi | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Materi soal-soal sesuai dengan konsep-konsep materi yang diberikan pada kegiatan praktek | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Materi soal-soal sesuai dengan konsep-konsep materi yang diberikan pada kegiatan praktik | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Tingkat kesulitan soal-soal diberikan secara gradual dari mudah ke tingkat yang lebih sulit | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Kualitas Umpan Balik | Simulator menyediakan fasilitas umpan balik yang baik, jika pengguna melakukan kesalahan pengaturan/pemasukan data | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

Lampiran 2

INSTRUMEN EVALUASI ASPEK TAMPILAN PRODUK
PERANGKAT PEMBELAJARAN SISTEM KENDALI
MOTOR INDUKSI BERKINERJA TINGGI

Petunjuk:

1. Pengisian angket dilakukan dengan cara (1) memberi tanda silang (X) pada pilihan persepsi yang tersedia di setiap komponen.
2. Komentar/saran dapat diberikan pada setiap sub aspek.

Kriteria pilihan persepsi:

1. Sangat tidak setuju
2. Tidak setuju
3. Ragu-ragu
4. Setuju
5. Sangat setuju

| Sub Aspek | Kriteria | Pilihan Persepsi | | | | | Komentar/ Saran |
|------------|--|------------------|---|---|---|---|--------------------|
| Tata Letak | Tata letak komponen simulator sudah serasi dan tidak terlalu padat | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Tata letak teks, tabel, gambar, grafik pada buku panduan pengoperasian simulator sudah serasi dan tidak terlalu padat | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Tata letak teks, tabel, gambar, grafik pada panduan praktik sudah serasi dan tidak terlalu padat | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Jenis huruf yang digunakan untuk judul dan keterangan tiap unit pada simulator sudah tepat | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Ukuran huruf yang digunakan untuk judul dan keterangan tiap unit pada simulator sudah proporsional | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Warna huruf yang digunakan untuk judul dan keterangan tiap unit pada simulator sudah tepat | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |

| | | | | | | |
|-----------------|--|---|---|---|---|---|
| Kualitas Teks | Secara umum tampilan huruf pada simulator mudah dibaca | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Jenis huruf yang digunakan pada buku panduan pengoperasian simulator sudah tepat | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Ukuran huruf yang digunakan pada buku panduan pengoperasian simulator sudah proporsional | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Warna huruf yang digunakan pada buku panduan pengoperasian simulator sudah tepat | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Secara umum tampilan huruf pada buku panduan pengoperasian simulator mudah dibaca | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Jenis huruf yang digunakan pada buku panduan praktik sudah tepat | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Ukuran huruf yang digunakan pada buku panduan praktik sudah proporsional | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Warna huruf yang digunakan pada buku panduan praktik sudah tepat | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Secara umum tampilan huruf pada buku panduan praktik mudah dibaca | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Kualitas Gambar | Gambar simbol-simbol komponen yang digunakan pada simulator relevan dengan materi Sistem Kendali Motor Berkinerja Tinggi | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Tampilan gambar pada simulator menggunakan resolusi yang memadai | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Pengaturan kekontrasan sudah tepat antara gambar pada simulator dan latar belakangnya | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Secara umum kualitas gambar pada simulator sebagai media pembelajaran Praktik Sistem Kendali Motor Induksi Berkinerja Tinggi baik | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Gambar-gambar yang digunakan pada buku panduan pengoperasian simulator relevan dengan materi Sistem Kendali Motor Berkinerja Tinggi | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Tampilan gambar-gambar pada buku panduan pengoperasian simulator menggunakan resolusi yang memadai | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Pengaturan kekontrasan antara gambar-gambar pada buku panduan pengoperasian simulator dan latar belakangnya sudah tepat | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

| | | | | | | |
|----------------------------------|--|---|---|---|---|---|
| | Secara umum kualitas gambar-gambar pada buku panduan pengoperasian simulator baik | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Gambar-gambar yang digunakan pada buku panduan praktik relevan dengan materi perkuliahan Sistem Kendali Motor Berkinerja Tinggi | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Tampilan gambar-gambar pada buku panduan praktik menggunakan resolusi yang memadai | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Pengaturan kekontrasan antara gambar-gambar pada buku panduan praktik dan latar belakangnya sudah tepat | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Secara umum kualitas gambar-gambar pada buku panduan praktik baik | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Penggunaan Warna | Penggunaan warna kuning pada panel input simulator (Pemilih Skenario dan Pemilih Mode Catu Daya) sesuai | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Penggunaan warna hijau pada panel output simulator (<i>Display Output</i> dan <i>Pulse Display</i>) sesuai | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Penggunaan warna biru untuk judul dan keterangan nit-unit dari simulator sesuai | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Penggunaan warna hitam untuk identitas blok pada simulator mempermudah <i>setting</i> parameter simulator | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Penggunaan warna pada panel-panel simulator mempermudah dalam membedakan jenis panel | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Penggunaan warna pada tampilan grafik hasil simulasi pada simulator sesuai | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Secara umum komposisi warna pada panel-panel simulator baik dan enak dipandang | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Penggunaan komposisi warna pada buku panduan pengoperasian simulator sesuai | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Penggunaan komposisi warna pada buku panduan praktik sesuai | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Kualitas Animasi/ Hasil Simulasi | Tampilan grafik hasil simulasi relevan dengan materi praktik Sistem Kendali Motor Induksi Berkinerja Tinggi | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Tampilan grafik hasil simulasi menggunakan resolusi yang memadai | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Pengaturan kekontrasan tepat antara tampilan kurva hasil simulasi dan latar belakangnya | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

| | | | | | | | |
|---------------------------------|---|---|---|---|---|---|--|
| | Tampilan grafik hasil simulasi mendukung pemahaman mahasiswa terhadap materi Sistem Kendali Motor Berkinerja Tinggi | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Skala grafik hasil simulasi mudah diatur | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Fungsi dan Konsistensi Navigasi | Tombol saklar Pemilih Skenario berfungsi dengan baik | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Panel/blok Pemilih Mode Catu Daya berfungsi dengan baik | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Semua Panel/blok untuk <i>setting</i> parameter simulator berfungsi dengan baik | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Bentuk dan penempatan blok untuk seluruh unit pada simulator konsisten sehingga mudah dikenali | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |

Lampiran 3

**INSTRUMEN EVALUASI ASPEK ISI
PERANGKAT PEMBELAJARAN SISTEM KENDALI
MOTOR INDUKSI BERKINERJA TINGGI**

Petunjuk:

1. Pengisian angket dilakukan dengan cara (1) memberi tanda silang (X) pada pilihan persepsi yang tersedia di setiap komponen.
2. Komentar/saran dapat diberikan pada setiap sub aspek.

Kriteria pilihan persepsi:

1. Sangat tidak setuju
2. Tidak setuju
3. Ragu-ragu
4. Setuju
5. Sangat setuju

| Sub Aspek | Kriteria | Pilihan Persepsi | | | | | Komentar/ Saran |
|--|---|------------------|---|---|---|---|--------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Kesesuaian Materi dengan Tujuan Pembelajaran | Materi yang ada dalam perangkat pembelajaran ini sesuai dengan kompetensi dasar yang harus dicapai oleh mahasiswa | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Materi yang ada dalam perangkat pembelajaran ini sesuai dengan tujuan praktik yang akan dicapai | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Kedalaman dan keluasan materi yang disediakan oleh perangkat pembelajaran ini sesuai dengan tingkat pendidikan pengguna | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Kebenaran Struktur Materi | Struktur materi dalam perangkat pembelajaran ini telah sesuai dengan kaidah bidang ilmu teknik elektro | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Keakuratan Isi Materi | Materi dan istilah-istilah yang ada pada perangkat pembelajaran ini akurat dan tidak ada yang salah | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |

| | | | | | | | |
|--------------------------|--|---|---|---|---|---|--|
| Kebenaran Tata Bahasa | Uraian materi pada perangkat pembelajaran ini mengacu pada kaidah tata Bahasa Indonesia yang baik dan benar | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Kalimat yang dipakai dalam perangkat pembelajaran ini efektif | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Materi dalam perangkat pembelajaran ini disampaikan menggunakan bahasa yang menarik dan lazim dalam komunikasi tulis Bahasa Indonesia | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Kebenaran Ejaan | Uraian materi pada perangkat pembelajaran ini telah menggunakan ejaan yang benar sesuai kaidah Ejaan Yang Disempurnakan (EYD) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Kebenaran Istilah | Istilah-istilah umum yang digunakan pada uraian materi dalam perangkat pembelajaran ini telah menggunakan istilah baku sesuai Kamus Besar Bahasa Indonesia | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Istilah-istilah teknis yang digunakan pada perangkat pembelajaran ini mencacu pada istilah-istilah yang lazim digunakan di lingkungan bidang ilmu teknik elektro | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Penggunaan istilah yang menggambarkan suatu konsep pada perangkat pembelajaran ini, telah dilakukan secara konsisten pada setiap bagian dari uraian materi | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Penggambaran simbol dan/atau notasi telah dilakukan secara konsisten antar-bagian dalam perangkat pembelajaran ini | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Kebenaran Tanda Baca | Uraian materi pada perangkat pembelajaran ini telah menggunakan tanda baca yang benar sesuai aturan baku pada EYD | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |

Lampiran 4

INSTRUMEN EVALUASI SUMATIF
PERANGKAT PEMBELAJARAN SISTEM KENDALI
MOTOR INDUKSI BERKINERJA TINGGI

Petunjuk:

1. Pengisian angket dilakukan dengan cara (1) memberi tanda silang (X) pada pilihan persepsi yang tersedia di setiap komponen.
2. Komentar/saran dapat diberikan pada setiap sub aspek.

Kriteria pilihan persepsi:

1. Sangat tidak setuju
2. Tidak setuju
3. Ragu-ragu
4. Setuju
5. Sangat setuju

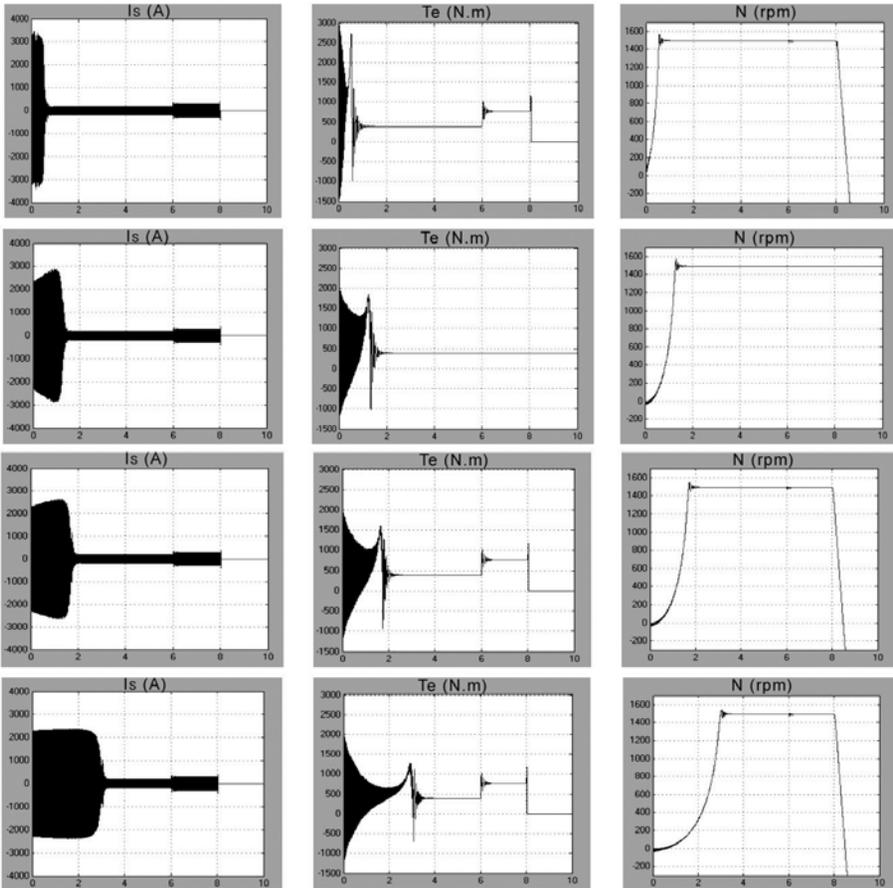
| Sub Aspek | Kriteria | Pilihan Persepsi | | | | | Komentar/ Saran |
|-----------|---|------------------|---|---|---|---|--------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Tampilan tema pada disain simulator sudah sesuai dengan karakteristik mahasiswa | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Penyajian panel-panel yang tersedia mempermudah mahasiswa dalam melakukan <i>setting</i> parameter simulator | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Penyajian panel-panel yang tersedia mempermudah mahasiswa dalam mengenal bagian-bagian simulator | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Penyajian panel-panel yang tersedia mempermudah mahasiswa dalam menjalankan simulator | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Penyajian <i>display</i> output simulator mempermudah mahasiswa dalam memahami karakteristik dinamis motor | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |

| | | | | | | |
|-----------------------|---|---|---|---|---|---|
| Kemudahan Operasi | induksi yang dikendalikan dengan sistem kedali berkinerja tinggi | | | | | |
| | Penggunaan simulator mempermudah pencapaian tujuan belajar | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Penyajian materi pada buku panduan pengoperasian simulator sesuai dengan karakteristik mahasiswa | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Penyajian materi pada buku panduan pengoperasian simulator dilakukan secara sistematis sehingga mudah dipahami | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Uraian materi pada buku panduan pengoperasian simulator mencerminkan hubungan yang erat antar topik | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Penyajian materi pada buku panduan pengoperasian simulator dilakukan secara bertahap dari mudah ke arah yang sulit, dari sederhana ke arah yang lebih rumit, atau dari bersifat konkrit ke abstrak | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Penyajian materi pada buku panduan praktik sudah sesuai dengan karakteristik mahasiswa | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Penyajian materi pada buku panduan praktik dilakukan secara sistematis sehingga mudah dipahami | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Uraian materi pada buku panduan praktik mencerminkan hubungan yang erat antar topik | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Penyajian materi pada buku panduan praktik dilakukan secara bertahap dari mudah ke arah yang sulit, dari sederhana ke arah yang lebih rumit, atau dari bersifat konkrit ke abstrak | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Pembangkitan Motivasi | Praktik menggunakan simulator dapat lebih meningkatkan motivasi mahasiswa dari pada praktik menggunakan peralatan real | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

| | | | | | | | |
|---------------------------|---|---|---|---|---|---|--|
| Kemenarikan | Mengikuti praktik dengan menggunakan simulator ini lebih menarik dibandingkan praktek menggunakan laboratorium real | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Penyajian materi pada perangkat pembelajaran ini menarik minat dan perhatian mahasiswa | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Belajar Mandiri | Simulator dapat mengarahkan penggunaannya untuk belajar mandiri | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Penyajian materi pada buku panduan pengoperasian simulator dapat mengarahkan penggunaannya untuk belajar mandiri | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Penyajian materi pada buku panduan praktik dapat mengarahkan penggunaannya untuk belajar mandiri | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Kerja Sama Dalam Kelompok | Perangkat pembelajaran ini mampu mendorong mahasiswa untuk belajar aktif saling bekerjasama dalam kelompok | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Manfaat | Penyajian materi pada buku panduan pengoperasian simulator dapat meningkatkan keterampilan mahasiswa dalam mengoperasikan Simulator | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Penyajian materi pada buku panduan praktik dapat meningkatkan pengetahuan mahasiswa tentang pengendalian motor induksi berkinerja tinggi | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |

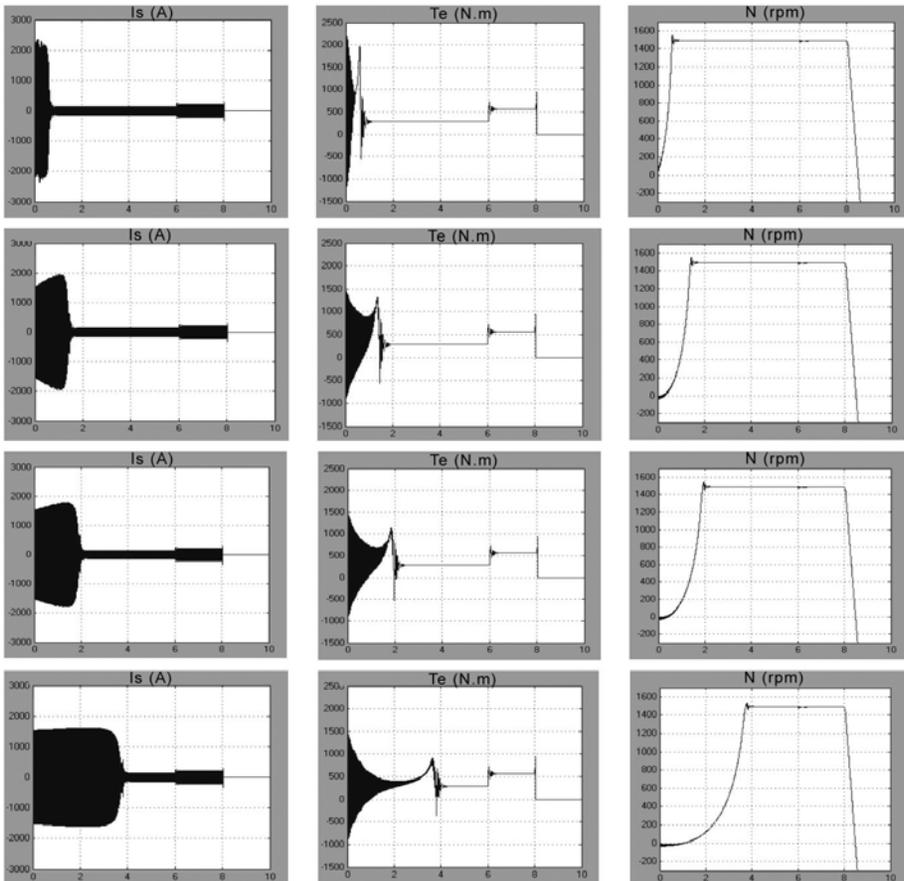
Lampiran 5

Data Karakteristik Arus (Kiri), Torsi (Tengah), dan Kecepatan Rotor (Kanan) Dalam Domain Waktu Menggunakan Catu Berturut-turut Dari Atas ke Bawah: Langsung, *Soft-Start* Cepat, *Soft-Start* Sedang, dan *Soft-Start* Lambat Untuk **Motor 215 HP** Dikendalikan Menggunakan Sistem Kendali Berkinerja Tinggi



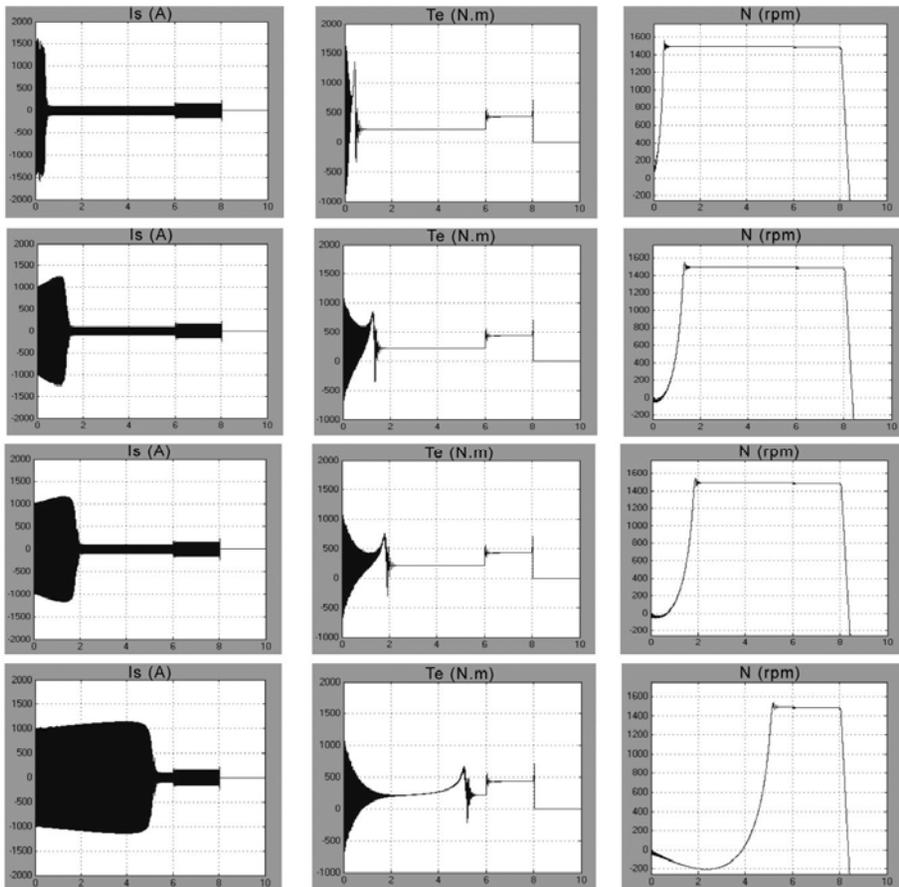
Lampiran 6

Data Karakteristik Arus (Kiri), Torsi (Tengah), dan Kecepatan Rotor (Kanan) Dalam Domain Waktu Menggunakan Catu Berturut-turut Dari Atas ke Bawah: Langsung, *Soft-Start* Cepat, *Soft-Start* Sedang, dan *Soft-Start* Lambat Untuk **Motor 150 HP** Dikendalikan Menggunakan Sistem Kendali Berkinerja Tinggi



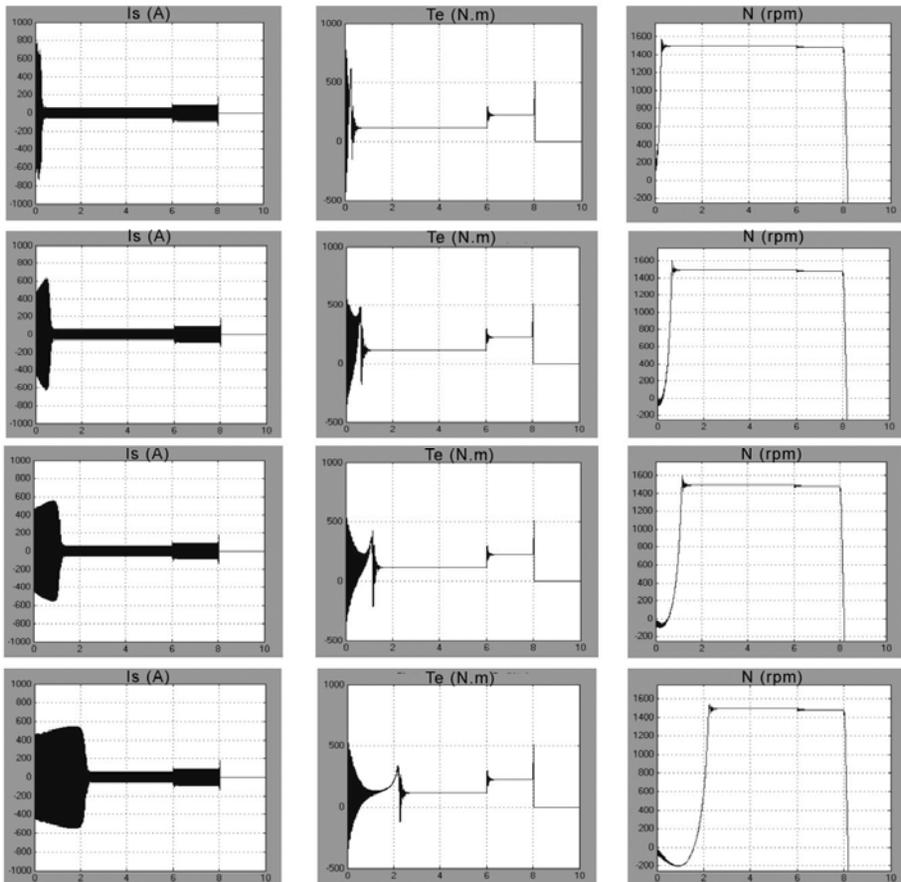
Lampiran 7

Data Karakteristik Arus (Kiri), Torsi (Tengah), dan Kecepatan Rotor (Kanan) Dalam Domain Waktu Menggunakan Catu Berturut-turut Dari Atas ke Bawah: Langsung, *Soft-Start* Cepat, *Soft-Start* Sedang, dan *Soft-Start* Lambat Untuk **Motor 100 HP** Dikendalikan Menggunakan Sistem Kendali Berkinerja Tinggi



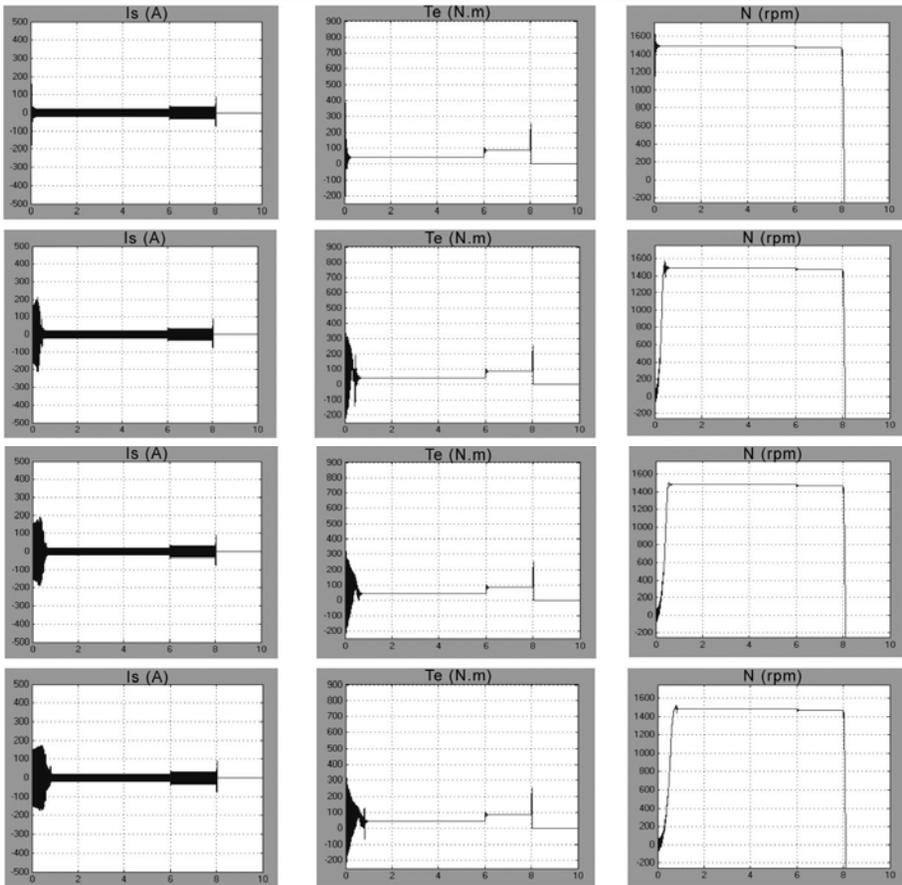
Lampiran 8

Data Karakteristik Arus (Kiri), Torsi (Tengah), dan Kecepatan Rotor (Kanan) Dalam Domain Waktu Menggunakan Catu Berturut-turut Dari Atas ke Bawah: Langsung, *Soft-Start* Cepat, *Soft-Start* Sedang, dan *Soft-Start* Lambat Untuk Motor 50 HP Dikendalikan Menggunakan Sistem Kendali Berkinerja Tinggi



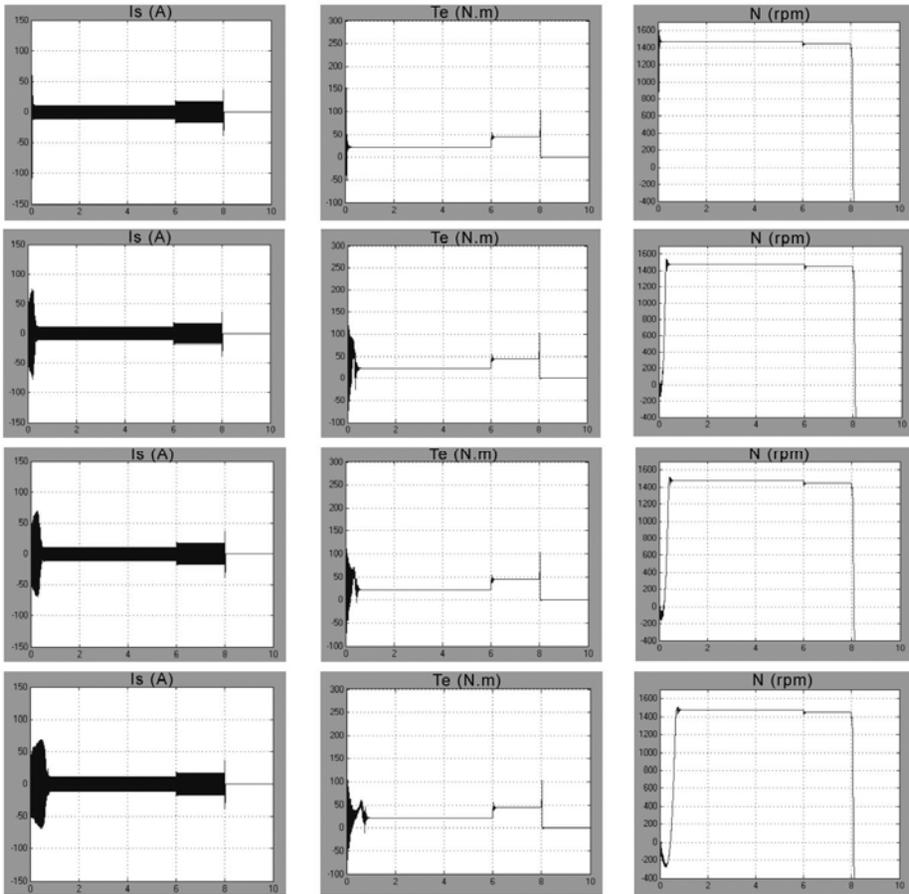
Lampiran 9

Data Karakteristik Arus (Kiri), Torsi (Tengah), dan Kecepatan Rotor (Kanan) Dalam Domain Waktu Menggunakan Catu Berturut-turut Dari Atas ke Bawah: Langsung, *Soft-Start* Cepat, *Soft-Start* Sedang, dan *Soft-Start* Lambat Untuk **Motor 20 HP** Dikendalikan Menggunakan Sistem Kendali Berkinerja Tinggi



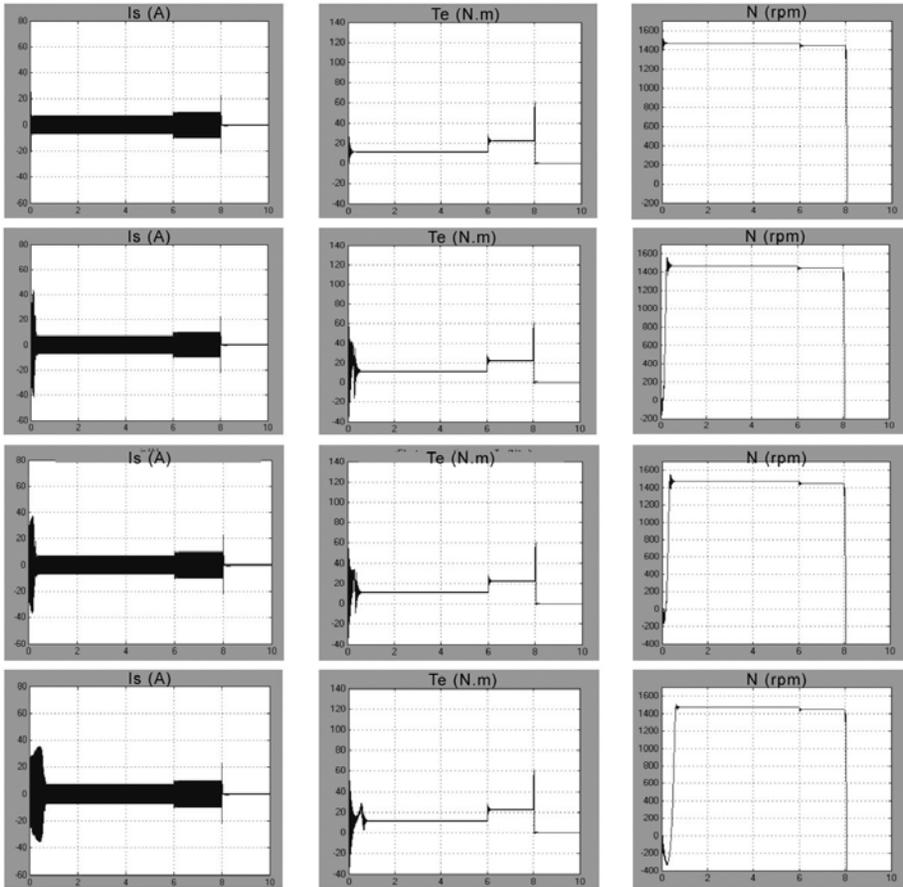
Lampiran 10

Data Karakteristik Arus (Kiri), Torsi (Tengah), dan Kecepatan Rotor (Kanan) Dalam Domain Waktu Menggunakan Catu Berturut-turut Dari Atas ke Bawah: Langsung, *Soft-Start* Cepat, *Soft-Start* Sedang, dan *Soft-Start* Lambat Untuk **Motor 10 HP** Dikendalikan Menggunakan Sistem Kendali Berkinerja Tinggi



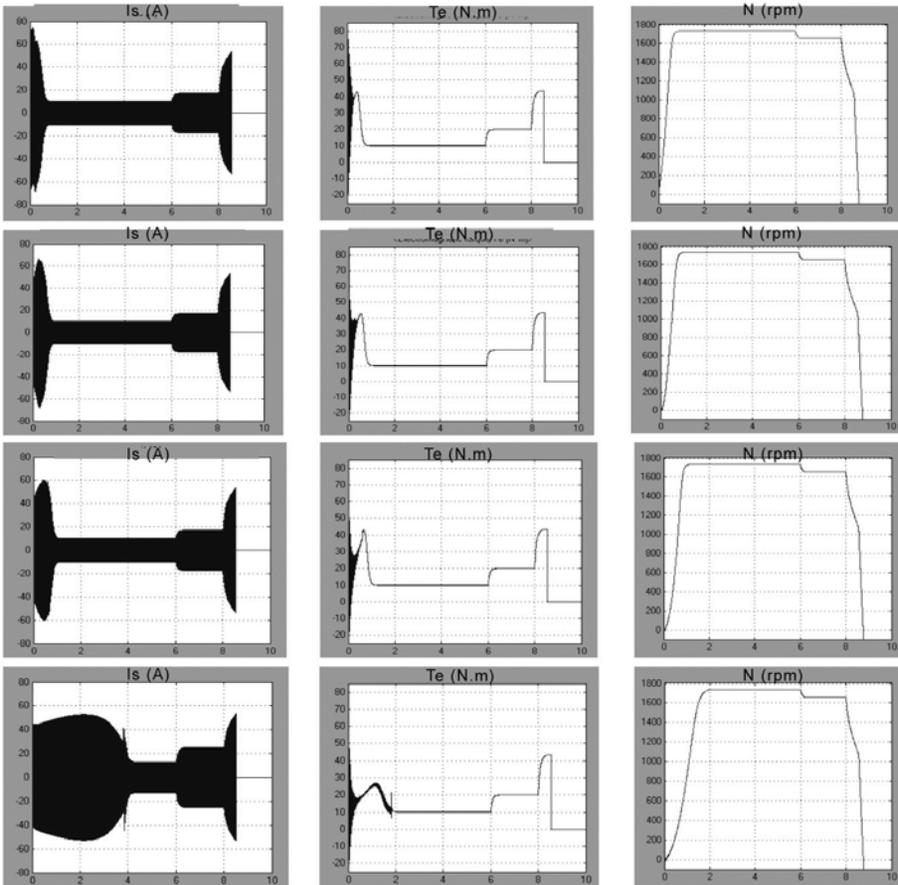
Lampiran 11

Data Karakteristik Arus (Kiri), Torsi (Tengah), dan Kecepatan Rotor (Kanan) Dalam Domain Waktu Menggunakan Catu Berturut-turut Dari Atas ke Bawah: Langsung, *Soft-Start* Cepat, *Soft-Start* Sedang, dan *Soft-Start* Lambat Untuk Motor 5 HP Dikendalikan Menggunakan Sistem Kendali Berkinerja Tinggi



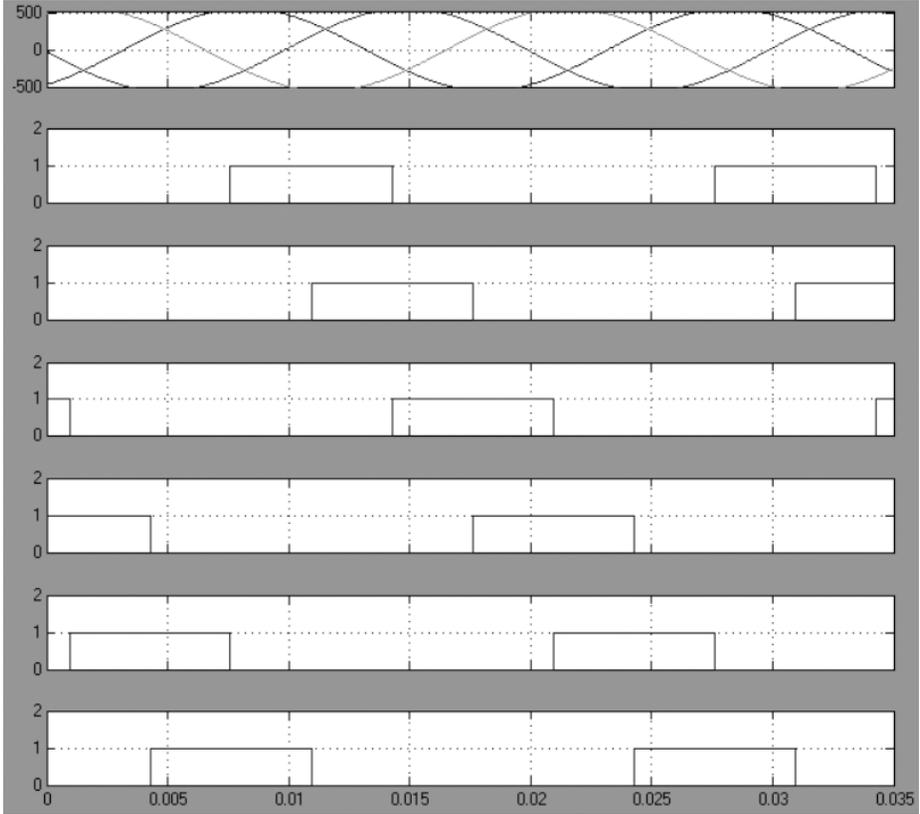
Lampiran 12

Data Karakteristik Arus (Kiri), Torsi (Tengah), dan Kecepatan Rotor (Kanan) Dalam Domain Waktu Menggunakan Catu Berturut-turut Dari Atas ke Bawah: Langsung, *Soft-Start* Cepat, *Soft-Start* Sedang, dan *Soft-Start* Lambat Untuk **Motor 3,4 HP** Dikendalikan Menggunakan Sistem Kendali Berkinerja Tinggi



Lampiran 13

Bentuk Gelombang Pulsa Pemicu Untuk $f = 50$ Hz dan Lebar = 60°



BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Kebumen, Jawa Tengah, pada 18 Februari 1962. Sarjana Pendidikan Fisika diperoleh dari Universitas Negeri Yogyakarta pada 1986, dan Magister Teknik diraih dari program studi Teknik Elektro Universitas Gadjah Mada pada 1998. Doktor pada bidang Pendidikan Teknologi dan Kejuruan diraih dari Universitas Negeri Yogyakarta pada 2013.

Semenjak 1987 sampai sekarang aktif sebagai dosen pada program studi Pendidikan Fisika, Teknik Elektro, dan Magister Pendidikan Vokasi Universitas Ahmad Dahlan untuk matakuliah Elektronika Analog, Elektronika Digital/Mikroprosesor, dan Strategi Pembelajaran Pendidikan Teknologi & Vokasi.

Kajian ini secara detail mendeskripsikan proses pengembangan perangkat pembelajaran dalam bentuk simulator sistem kendali motor berkinerja tinggi yang di dalamnya terdapat unit *soft-starter* dan unit *stall detection* berbasis perangkat lunak SIMULINK dari Matlab. Selain itu, monograf ini juga menyediakan referensi berupa informasi hasil uji kinerja dan persepsi pengguna dosen, guru dan mahasiswa terhadap penggunaan perangkat pembelajaran yang dikembangkan oleh penulis sebagai peneliti.

Monograf ini dapat dimanfaatkan oleh dosen di lingkungan program studi Teknik Elektro dan guru Sekolah Menengah Kejuruan (SMK) sebagai referensi untuk merancang kegiatan pembelajaran di kelas dengan pendekatan demonstrasi, maupun praktik di laboratorium (pengganti praktik *hands-on*) secara simulatif untuk materi pengendalian motor induksi tiga fase menggunakan *thyristor*. Topik-topik praktik yang dapat diselenggarakan dengan simulator yang ada di dalam monograf ini antara lain karakteristik dinamis motor induksi tiga fase dengan catu *direct-on-line supplied*, *soft starter* dan *stall detector*, serta analisis bentuk gelombang tegangan dan arus motor dengan pengendali tegangan oleh *thyristor*. Selain itu, monograf juga dapat digunakan sebagai referensi bagi peneliti yang tertarik melakukan riset pengembangan perangkat pembelajaran yang terkait dengan implementasi simulator berbasis SIMULINK dari Matlab, khususnya untuk bidang pengendalian motor induksi berkinerja tinggi dengan menggunakan piranti *thyristor* sebagai *voltage controller*.

Penulis dilahirkan di Kebumen, Jawa Tengah, pada 18 Februari 1962. Sarjana Pendidikan Fisika diperoleh dari Universitas Negeri Yogyakarta pada 1986, dan Magister Teknik diraih dari program studi Teknik Elektro Universitas Gadjah Mada pada 1998. Doktor pada bidang Pendidikan Teknologi dan Kejuruan diraih dari Universitas Negeri Yogyakarta pada 2013. Semenjak 1987 sampai sekarang aktif sebagai dosen pada program studi Pendidikan Fisika, Teknik Elektro, dan Magister Pendidikan Vokasi Universitas Ahmad Dahlan untuk matakuliah Elektronika Analog, Elektronika Digital/Mikroprosesor, dan Strategi Pembelajaran Pendidikan Teknologi & Vokasi.



UAD Press

(Anggota IKAPI dan APPTI)

Alamat Penerbit:

Kampus IV Universitas Ahmad Dahlan

Jl. Ringroad Selatan, Tamanan,

Banguntapan, Bantul, Yogyakarta

E-mail: uadpress@uad.ac.id

HP/WA: 082134455340

ISBN 978-602-0737-52-2

