



**PENINGKATAN RESPON KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA
BERBASIS ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM (ANFIS)
YANG DIOPTIMASI GREY WOLF OPTIMIZER (GWO)**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar magister

GANJAR CANDRA SUMINDAR

55424110010

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS MERCU BUANA
JAKARTA**

2026

HALAMAN PERNYATAAN KARYA SENDIRI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ganjar Candra Sumindar
NIM : 55424110010
Fakultas/Program Studi : Fakultas Teknik /Magister Teknik Elektro

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa Tesis berjudul: “Peningkatan Respon Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Berbasis Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) Yang Dioptimasi Grey Wolf Optimizer (GWO)” adalah hasil karya saya sendiri, tidak mengandung unsur plagiarisme, pelanggaran hak cipta, atau konten ilegal dalam bentuk apapun dan tidak melanggar hukum atau hak pihak manapun.

Apabila di kemudian hari ditemukan pelanggaran terhadap pernyataan ini, saya bersedia menanggung seluruh konsekuensi hukum dan membebaskan Universitas Mercu Buana dari segala bentuk tuntutan hukum dan saya siap mendapatkan sanksi akademis yang berlaku di Universitas Mercu Buana.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya untuk digunakan sebagaimana mestinya.

Jakarta, Maret 2026



Ganjar Candra Sumindar
NIM. 55424110010

SURAT KETERANGAN HASIL *SIMILARITY*

Menerangkan bahwa Jurnal / Karya Ilmiah / Laporan Tugas Akhir pada BAB I, BAB III, BAB IV, dan BAB V / Praktek Keinsinyuran atas nama:

Nama : **Ganjar Candra Sumindar**
NIM : **55424110010**
Program Studi : **Magister Teknik Elektro**
Judul Tugas Akhir / Tesis
/ Praktek Keinsinyuran : **Peningkatan Respon Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Berbasis Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) Yang Dioptimasi Grey Wolf Optimizer (GWO)**

Telah dilakukan pengecekan *Similarity* menggunakan aplikasi/sistem *Turnitin* pada **Sabtu, 29 Agustus 2026** dengan hasil presentase sebesar **18 %** dan dinyatakan memenuhi standar sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Fakultas Teknik Universitas Mercu Buana.
Demikian surat keterangan ini dibuat dan digunakan sebagaimana mestinya.

Jakarta, 29 Agustus 2026

Administrator Turnitin,



Itmam Haidi Syarif

HALAMAN PENGESAHAN

Laporan Tesis ini diajukan oleh:

Nama : Ganjar Candra Sumindar
NIM : 55424110010
Program Studi : Magister Teknik Elektro
Judul Tesis : Peningkatan Respon Kecepatan Motor Induksi
Tiga Fasa Berbasis Adaptive Neuro-Fuzzy
Inference System (ANFIS) Yang Dioptimasi
Grey Wolf Optimizer (GWO)

Telah berhasil dipertahankan dalam sidang di hadapan Dewan Penguji dan dinyatakan lulus, serta memenuhi salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana.

Jakarta, 25 Agustus 2026

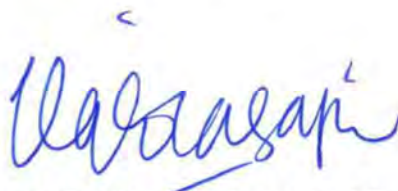
Disahkan oleh:
Pembimbing,



Prof. Dr. Ir. Andi Adriansyah, M.Eng.
NIDN: 0327027002

Mengetahui,

Dekan
Fakultas Teknik



Dr. Zulfa Fitri Ikatrinasari, M.T
NIDN: 0307037202

Ketua Program Studi
Magister Teknik Elektro



**Prof. Dr. Ir. Setiyo Budiyanto, S.T., M.T., I.P.U.,
Asean-Eng., APEC-Eng., ACPE., SMIEEE**
NIDN: 0312118206

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan Tesis ini. Penulisan Tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Elektro Universitas Mercu Buana. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan Tesis ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan Tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua, istri, anak serta keluarga yang telah membantu dengan memberikan dukungan, do'a dan semangat supaya penulis dapat menyelesaikan penulisan tesis.
2. Prof. Dr. Ir. Andi Adriansyah, M.Eng selaku Rektor Universitas Mercu Buana dan Dosen Pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis.
3. Porf. Dr. Ir. Setiyo Budiyo, S.T., M.T., I.P.U., Asean-Eng., APEC-Eng., ACPE., SMIEEE selaku ketua Program Studi Magister Teknik Elektro yang telah memberikan kesempatan saya dapat kuliah di Universitas Mercu Buana dan ilmu serta bimbingan selama perkuliahan.
4. Dr. Eng. Ir. Heru Sutoyo, S.T, M.Sc selaku Dosen Penguji Tesis atas koreksi dan arahan serta masukannya.
5. Seluruh dosen Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Mercu Buana atas ilmu dan wawasan yang diberikan.
6. Pimpinan dan rekan kerja yang telah membantu dengan memberikan dukungan dan do'a supaya tesis ini dapat selesai tepat waktu.

Saya menyadari bahwa dalam penulisan tesis ini masih banyak terdapat kekurangan. Oleh karena itu, saya meminta saran dan kritik yang membangun dalam penulisan tesis ini untuk memperbaiki dan mengembangkan penelitian ini. Akhir kata, saya berharap Allah SWT membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga Tesis ini membawa manfaat bagi pengembang ilmu pengetahuan.

Jakarta, Maret 2026

Penulis

Ganjar Candra Sumindar

NIM. 55424110010

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR DI REPOSITORI UMB

Sebagai sivitas akademik Universitas Mercu Buana, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ganjar Candra Sumindar
NIM : 55424110010
Fakultas/Program Studi : Fakultas Teknik/Magister Teknik Elektro
Judul Tesis : Peningkatan Respon Kecepatan Motor Induksi
Tiga Fasa Berbasis Adaptive Neuro-Fuzzy
Inference System (ANFIS) Yang Dioptimasi
Grey Wolf Optimizer (GWO)

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, dengan ini memberikan izin dan menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Mercu Buana **Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul di atas beserta perangkat yang ada (jika diperlukan).

Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif ini Universitas Mercu Buana berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat dan mempublikasikan Tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Jakarta, Maret 2026

Yang menandatangani,



Ganjar Candra Sumindar

NIM. 55424110010

ABSTRAK

Motor induksi tiga fasa merupakan salah satu motor listrik yang banyak digunakan pada sistem industri karena memiliki konstruksi sederhana, kuat, andal, dan sesuai untuk berbagai aplikasi penggerak. Namun, karakteristik motor induksi yang nonlinier menyebabkan pengendalian kecepatan memerlukan metode yang mampu menghasilkan respons cepat, stabil, dan memiliki kesalahan keadaan tunak yang rendah. Penelitian ini mengembangkan pengendali Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) yang dioptimasi menggunakan Grey Wolf Optimizer (GWO) pada sistem pengendalian kecepatan motor induksi tiga fasa berbasis Indirect Field Oriented Control (IFOC).

Penelitian menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan simulasi dan evaluasi numerik. Dataset yang digunakan terdiri atas 200.000 sampel dengan speed error (e) dan perubahan error (de/dt) sebagai input, serta referensi torsi elektromagnetik (T_e^*) sebagai output. Data dibagi menjadi 70% data training dan 30% data checking. ANFIS Standard menggunakan tujuh Generalized Bell Membership Function pada setiap input sehingga membentuk 49 fuzzy rule, 42 parameter premise, dan 147 parameter consequent. GWO digunakan untuk mengoptimasi 42 parameter premise dengan populasi 20 wolf dan maksimum 30 iterasi. Pengujian closed-loop dilakukan pada kecepatan referensi 50 rad/s.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa ANFIS Standard menghasilkan rise time 0,052500 s, steady-state error 3,874150 rad/s, overshoot 8,437474%, dan belum mencapai settling time dalam 2 detik. Setelah optimasi, ANFIS-GWO menghasilkan rise time 0,046500 s, settling time 1,063000 s, steady-state error 0,448717 rad/s, dan overshoot 6,657061%. Dibandingkan ANFIS Standard, ANFIS-GWO menurunkan rise time sebesar 11,43%, steady-state error sebesar 88,42%, dan overshoot sebesar 21,10%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa optimasi parameter premise ANFIS menggunakan GWO mampu meningkatkan karakteristik respons dinamis sistem pengendalian kecepatan motor induksi tiga fasa.

Kata kunci: ANFIS, Grey Wolf Optimizer, motor induksi tiga fasa, IFOC, pengendalian kecepatan.

ABSTRACT

Three-phase induction motors are widely used in industrial systems because of their simple construction, robustness, reliability, and suitability for various drive applications. However, the nonlinear characteristics of induction motors require a speed control method capable of providing a fast and stable response with low steady-state error. This study develops an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) controller optimized using the Grey Wolf Optimizer (GWO) for a three-phase induction motor speed control system based on Indirect Field Oriented Control (IFOC).

This study employed a quantitative method using simulation and numerical evaluation. The dataset consisted of 200,000 samples, with speed error (e) and the rate of change of error (de/dt) as inputs and electromagnetic torque reference (T_e^*) as the output. The data were divided into 70% training data and 30% checking data. The Standard ANFIS used seven Generalized Bell Membership Functions for each input, resulting in 49 fuzzy rules, 42 premise parameters, and 147 consequent parameters. GWO was used to optimize the 42 premise parameters with a population of 20 wolves and a maximum of 30 iterations. Closed-loop testing was performed at a reference speed of 50 rad/s.

The results show that the Standard ANFIS produced a rise time of 0.052500 s, a steady-state error of 3.874150 rad/s, an overshoot of 8.437474%, and did not reach settling within the 2-second simulation horizon. After optimization, ANFIS-GWO achieved a rise time of 0.046500 s, a settling time of 1.063000 s, a steady-state error of 0.448717 rad/s, and an overshoot of 6.657061%. Compared with the Standard ANFIS, ANFIS-GWO reduced rise time by 11.43%, steady-state error by 88.42%, and overshoot by 21.10%. These results indicate that optimizing ANFIS premise parameters using GWO improves the dynamic response characteristics of the three-phase induction motor speed control system.

Keywords: ANFIS, Grey Wolf Optimizer, three-phase induction motor, IFOC, speed control.

DAFTAR ISI

COVER.....	i
HALAMAN PERNYATAAN KARYA SENDIRI	ii
SURAT KETERANGAN HASIL UJI TURNITIN	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR DI REPOSITORI UMB.....	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	11
1.3 Tujuan Penelitian.....	11
1.4 Manfaat Penelitian.....	12
1.5 Batasan Penelitian	12
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	13
2.1 Kajian Teori.....	13
2.1.1 Motor Induksi 3 Fasa	13
2.1.2 Pengendalian Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa	16
2.1.3 Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)	20
2.1.4 Optimasi Parameter ANFIS.....	29
2.1.5 ANFIS dengan Algoritma Metaheuristik	32
2.1.6 Grey Wolf Optimizer (GWO).....	46
2.1.7 Integrasi ANFIS-GWO.....	53
2.1.8 Performa Sistem Kontrol	58
2.1.9 Root Mean Square Error (RMSE).....	61
2.2 Penelitian Terdahulu	65
2.3 Diagram Venn	69
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	72
3.1 Tahapan Penelitian	72
3.2 Sistem Pengendalian Kecepatan Motor Induksi.....	74
3.3 Model Motor Induksi	76
3.3.1 Model Mekanik Motor.....	76
3.3.2 Parameter Motor Induksi.....	79
3.4 Indirect Field Oriented Control	80
3.5 Sumber dan Persiapan Dataset	83
3.5.1 Pembagian Data Training dan Checking.....	86
3.6 Generalized Bell Membership Function	88

3.7 Perancangan ANFIS Standar.....	91
3.7.1 Layer 1: Fuzzification.....	92
3.7.2 Layer 2: Firing Strength	92
3.7.3 Layer 3: Normalization.....	93
3.7.4 Layer 4: Consequent.....	93
3.7.5 Layer 5: Output.....	94
3.7.6 Jumlah Parameter ANFIS	95
3.8 Contoh Perhitungan ANFIS	96
3.9 Perancangan Grey Wolf Optimizer	101
3.9.1 Representasi Wolf.....	101
3.9.2 Hierarki Wolf.....	101
3.9.3 Koefisien GWO	102
3.9.4 Pembaruan Posisi.....	103
3.9.5 Population dan Iteration.....	106
3.10 Integrasi ANFIS-GWO	106
3.11 Fungsi Fitness RMSE.....	107
3.12 Rancangan Penentuan Parameter GWO.....	108
3.13 Rancangan Pengujian	109
3.14 Parameter Evaluasi	111
3.15 Perangkat Penelitian.....	113
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	114
4.1 Pembentukan dan Pengujian ANFIS Standard.....	114
4.1.1 Data Sebelum Pembentukan ANFIS Standard	114
4.1.2 Proses Pembentukan ANFIS Standard	116
4.1.3 Data Setelah Pembentukan ANFIS Standard	117
4.1.4 Evaluasi Data-Fit ANFIS Standard	118
4.1.5 Membership Function ANFIS Standard	119
4.1.6 Implementasi Closed-Loop ANFIS Standard pada Simulink.....	121
4.1.7 Hasil Closed-Loop ANFIS Standard	124
4.2 Pembentukan dan Pengujian ANFIS-GWO.....	127
4.2.1 Data Sebelum Optimasi ANFIS-GWO.....	127
4.2.2 Parameter Sebelum Optimasi GWO	129
4.2.3 Proses Optimasi Grey Wolf Optimizer.....	130
4.2.4 Data Setelah Optimasi ANFIS-GWO.....	131
4.2.5 Parameter dan Membership Function Setelah Optimasi GWO.....	133
4.2.6 Implementasi Closed-Loop ANFIS-GWO pada Simulink.....	136
4.2.7 Hasil Closed-Loop ANFIS-GWO	137
4.3 Perbandingan Kinerja ANFIS Standard dan ANFIS-GWO	138
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	140
5.1 Kesimpulan.....	140
5.2 Saran.....	141
DAFTAR PUSTAKA.....	142

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Algoritma Metaheuristik untuk Optimasi ANFIS.....	42
Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu	65
Tabel 3.1 Parameter Motor Induksi	79
Tabel 3.2 Parameter Current Controller.....	81
Tabel 3.3 Parameter Fractional PI Controller	84
Tabel 3.4 Struktur Dataset ANFIS	85
Tabel 3.5 Konfigurasi ANFIS Standar.....	91
Tabel 3.6 Jumlah Parameter ANFIS	96
Tabel 3.7 Rancangan Parameter GWO	109
Tabel 3.8 Rancangan Skenario Pengujian.....	110
Tabel 3.9 Parameter Evaluasi.....	112
Tabel 3.10 Perangkat Penelitian.....	113
Tabel 4.1 Sampel Data Sebelum Pembentukan ANFIS Standard.....	115
Tabel 4.2 Pembagian Dataset ANFIS Standard	116
Tabel 4.3 Konfigurasi ANFIS Standard.....	116
Tabel 4.4 Sampel Data Setelah Pembentukan ANFIS Standard.....	117
Tabel 4.5 Hasil Evaluasi Data-Fit ANFIS Standard	118
Tabel 4.6 Parameter Motor Induksi yang Digunakan pada Simulasi.....	121
Tabel 4.7 Konfigurasi Closed-Loop ANFIS	122
Tabel 4.8 Hasil Closed-Loop ANFIS Standard.....	126
Tabel 4.9 Sampel Data Sebelum Optimasi ANFIS-GWO	128
Tabel 4.10 Struktur 42 Parameter Premise Sebelum Optimasi GWO	129
Tabel 4.11 Konfigurasi Optimasi ANFIS-GWO	130
Tabel 4.12 Sampel Data Setelah Optimasi ANFIS-GWO	132
Tabel 4.13 Ringkasan Data-Fit Sebelum dan Setelah GWO	133
Tabel 4.14 Perbandingan 42 Parameter Premise Sebelum dan Setelah Optimasi GWO	133
Tabel 4.15 Hasil Closed-Loop ANFIS-GWO	137
Tabel 4.16 Perbandingan Kinerja Respons Sebelum dan Setelah Optimasi GWO ..	139

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Motor Induksi Tiga Fasa	13
Gambar 2.2 Diagram Blok Sistem Pengendalian Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa	17
Gambar 2.3 Struktur Arsitektur ANFIS	22
Gambar 2.4 Parameter ANFIS	27
Gambar 2.5 Proses pembelajaran ANFIS	29
Gambar 2.6 Optimasi Parameter ANFIS	32
Gambar 2.7 Proses Optimasi Parameter ANFIS Menggunakan (GA).....	34
Gambar 2.8 Proses Optimasi Parameter ANFIS Menggunakan Particle Swarm Optimization (PSO).....	36
Gambar 2.9 Proses Optimasi Parameter ANFIS dengan (ABC).....	38
Gambar 2.10 Proses Optimasi Parameter ANFIS Menggunakan ACO.....	40
Gambar 2.11 Proses Optimasi Parameter ANFIS Menggunakan Grey Wolf Optimizer (GWO).....	42
Gambar 2.12 Struktur Hierarki dan Mekanisme Pencarian GWO.....	46
Gambar 2.14 Alur Evaluasi Kandidat Parameter ANFIS	50
Gambar 2.15 Hubungan GWO dengan Parameter ANFIS Optimal	51
Gambar 2.17 Alur Optimasi GWO dan Inferensi ANFIS.....	52
Gambar 2.18 Alur Kerja ANFIS dioptimasi GWO pada Sistem Pengendalian Kecepatan Motor Induksi.....	53
Gambar 2.19 Alur Evaluasi Kandidat Parameter dalam Optimasi ANFIS Menggunakan GWO	55
Gambar 2.20 Blok Diagram ANFIS yang Dioptimasi Menggunakan Grey Wolf Optimizer (GWO)	56
Gambar 2.21 Parameter Kinerja Sistem Kontrol Berdasarkan Respons Step.....	58
Gambar 2.22 Proses Evaluasi Kandidat Parameter GWO pada ANFIS Menggunakan RMSE.....	62
Gambar 2.23 Posisi RMSE dalam Optimasi Parameter ANFIS dan Evaluasi Kinerja Sistem Kontrol	64
Gambar 2.24 Diagram Venn posisi penelitian ANFIS-GWO pada pengendalian kecepatan motor induksi tiga fasa	69
Gambar 3.1 Diagram Alir Tahapan Penelitian.....	73
Gambar 3.2 Struktur Closed-Loop Sistem Pengendalian Kecepatan Motor Induksi..	76
Gambar 3.3 Hubungan Command Torque dan Respons Mekanik Motor	78
Gambar 3.4 Struktur Indirect Field Oriented Control.....	82
Gambar 3.5 Proses Pembentukan Dataset ANFIS	85
Gambar 3.6 Pembagian Dataset Training dan Checking	87
Gambar 3.7 Pengaruh Parameter a, b, dan c terhadap Generalized Bell Membership Function	89

Gambar 3.8 Perbandingan Probability Density Function dan Generalized Bell Membership Function	90
Gambar 3.8 Arsitektur Lima Layer ANFIS	94
Gambar 3.9 Alur Contoh Perhitungan Satu Sampel ANFIS	100
Gambar 3.10 Hierarki Grey Wolf Optimizer	102
Gambar 3.11 Diagram Alir Grey Wolf Optimizer	105
Gambar 3.12 Integrasi Grey Wolf Optimizer pada ANFIS	107
Gambar 3.13 Skema Perbandingan ANFIS Standar dan ANFIS-GWO	110
Gambar 4.1 Hubungan Target dan Prediksi T_e^* pada Data Checking ANFIS Standard	118
Gambar 4.2 Membership Function Input e pada ANFIS Standard V2.1	119
Gambar 4.3 Membership Function Input de/dt pada ANFIS Standard V2.1	120
Gambar 4.4 Model Simulink Closed-Loop ANFIS Standard	123
Gambar 4.5 Respons Kecepatan Closed-Loop ANFIS Standard	124
Gambar 4.6 Respons ANFIS Standard terhadap Settling Band $\pm 2\%$	125
Gambar 4.7 Ringkasan Metrik Closed-Loop ANFIS Standard	126
Gambar 4.8 Kurva Konvergensi Grey Wolf Optimizer pada ANFIS-GWO	131
Gambar 4.9 Perbandingan Membership Function Input e Sebelum dan Setelah Optimasi GWO	134
Gambar 4.10 Perbandingan Membership Function Input de/dt Sebelum dan Setelah Optimasi GWO	135
Gambar 4.11 Model Simulink Closed-Loop ANFIS-GWO	136
Gambar 4.12 Perbandingan Respons Kecepatan ANFIS Standard dan ANFIS-GWO	138
Gambar 4.13 Perbandingan Rise Time, Settling Time, Steady-State Error, dan Overshoot	139

MERCU BUANA