



**PENGEMBANGAN MODEL ANFIS UNTUK PREDIKSI KAPASITANSI
DAN RESISTANSI MATERIAL KARBON AKTIF UNTUK
SUPERKAPASITOR**

TESIS

**UNIVERSITAS
MERCU BUANA**
MULYATI
55424110001

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK
FAKULTAS TEKNIK ELEKTRO
UNIVERSITAS MERCU BUANA
JAKARTA
2026**



**PENGEMBANGAN MODEL ANFIS UNTUK PREDIKSI KAPASITANSI
DAN RESISTANSI MATERIAL KARBON AKTIF UNTUK
SUPERKAPASITOR**

TESIS

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Magister

**UNIVERSITAS
MERCU BUANA**
MULYATI
55424110001

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK
FAKULTAS TEKNIK ELEKTRO
UNIVERSITAS MERCU BUANA
JAKARTA
2026**

HALAMAN PENYATAAN KARYA SENDIRI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Mulyati
NIM : 5542411001
Fakultas/Program Studi : Teknik/Magister Teknik Elektro

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa Tesis berjudul:

“ Pengembangan model ANFIS untuk prediksi kapasitansi dan resistansi material karbon aktif untuk superkapasitor”

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, 12 september 2026

Materai

Mulyati



SURAT KETERANGAN HASIL *SIMILARITY*

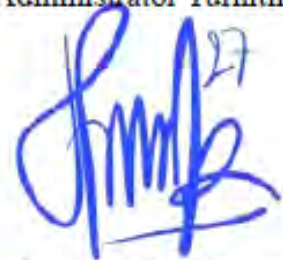
Menerangkan bahwa Jurnal / Karya Ilmiah / Laporan Tugas Akhir pada BAB I, BAB III, BAB IV, dan BAB V / Praktek Keinsinyuran atas nama:

Nama : Mulyati
NIM : 55424110001
Program Studi : Magister Teknik Elektro
Judul Tugas Akhir / Tesis
/ Praktek Keinsinyuran : Pengembangan model ANFIS untuk prediksi kapasitansi dan resistansi material karbon aktif untuk superkapasitor

Telah dilakukan pengecekan *Similarity* menggunakan aplikasi/sistem *Turnitin* pada Sabtu, 12 September 2026 dengan hasil presentase sebesar 15 % 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, 12 September 2026

Administrator Turnitin,



Itmam Haidi Syarif

HALAMAN PENGESAHAN

Laporan Tesis ini diajukan oleh:

Nama : Mulyati
NIM : 55424110001
Program Studi : Magister Teknik Elektro
Judul Tesis : Pengembangan model ANFIS untuk prediksi
kapasitansi dan resistansi material karbon aktif
untuk superkapasitor

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, 02 September 2026

**Disahkan oleh:
Pembimbing,**



Galang Persada Nurani Hakim, ST, MT., Ph.D

NIDN: 0304128502

Mengetahui,

Dekan
Fakultas Teknik



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

Ketua Program Studi
Magister Teknik Elektro



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

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada 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 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. Prof. Dr. Ir. Andi Adriansyah, M.Eng., selaku Rektor Universitas Mercu Buana
2. Dr. Zulfa Fitri Ikatrinasari, M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik
3. Prof. Dr. Ir. Setiyo Budiyanto, S.T., M.T., IPU, ASEAN Eng., APEC Eng., ACPE, selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro
4. Galang Persada Nurani Hakim, ST, MT., Ph.D selaku Dosen Pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan Tesis ini;
5. Orang Tua saya (ABD majid dan Ny Mariamah) yang selalu memberikan doa dan dukungan selama menyelesaikan Tesis.
6. Calon suami saya yang selalu menemani segala urusan terkait penyelesaian thesis dan seterusnya menurut penulis yang dianggap pantas dengan penulisan singkat.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga Tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

MERCU BUANA

Jakarta, 12 September 2026

mulyati

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR DI REPOSITORI UMB

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

Nama : Mulyati
NIM : 55424110001
Fakultas/Program Studi : Teknik/Magister Teknik Elektro
Judul Tesis : Pengembangan model ANFIS untuk prediksi
kapasitansi dan resistansi material karbon aktif
untuk superkapasitor

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, 12 September 2026

Yang menyatakan,



Mulyati

ABSTRAK

Superkapasitor berbasis karbon aktif memiliki kapasitansi spesifik (C_s) dan *Equivalent Series Resistance* (ESR) yang dipengaruhi oleh karakteristik struktur serta kimia material. Hubungan antarparameter tersebut bersifat kompleks dan nonlinear sehingga sulit dianalisis menggunakan pendekatan konvensional. Selain itu, penelitian sebelumnya lebih banyak memprediksi C_s , sedangkan pemodelan ESR sebagai target terpisah masih terbatas. Penelitian ini bertujuan membangun dan menganalisis model *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS) untuk memprediksi C_s dan ESR berdasarkan enam parameter karakterisasi karbon aktif, yaitu luas permukaan spesifik (SBET), volume pori (V_p), diameter pori (D_p), ukuran kristalit, sudut difraksi 2θ , dan gugus fungsi.

Penelitian ini menggunakan dataset yang terdiri atas 40 sampel karbon aktif. Dua model ANFIS dibangun secara terpisah, yaitu model prediksi C_s dan model prediksi ESR. Setiap model menggunakan enam variabel input, dua *Generalized Bell Membership Function* (GbellMF) pada setiap input, 64 aturan fuzzy, metode pembelajaran *hybrid*, dan maksimum 50 *epoch*. Pengujian dilakukan menggunakan tiga rasio data *testing:training*, yaitu 1:1, 1:2, dan 1:3. Kinerja setiap model dievaluasi menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE). Analisis sensitivitas juga dilakukan berdasarkan perubahan nilai RMSE untuk mengidentifikasi parameter input yang paling berpengaruh terhadap prediksi C_s dan ESR.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa rasio *testing:training* 1:3 menghasilkan kinerja terbaik dengan RMSE sebesar 10,55 F/g untuk prediksi C_s dan 0,1295 Ω untuk prediksi ESR. Pada model C_s , sensitivitas tertinggi mencapai $\Delta RMSE$ sebesar 83,006 F/g, sedangkan SBET menghasilkan $\Delta RMSE$ sebesar 73,973 F/g. Pada model ESR, ukuran kristalit menjadi parameter paling sensitif dengan $\Delta RMSE$ sebesar 0,7164 Ω , diikuti SBET sebesar 0,6321 Ω . Hasil ini menunjukkan bahwa setiap parameter karakterisasi memberikan pengaruh yang berbeda terhadap kinerja model. Secara keseluruhan, ANFIS mampu memetakan hubungan nonlinear antara karakteristik karbon aktif dan performa superkapasitor serta menghasilkan prediksi C_s dan ESR dengan kesalahan terendah pada rasio data 1:3.

Kata kunci: superkapasitor, karbon aktif, ANFIS, kapasitansi spesifik, *Equivalent Series Resistance*, analisis sensitivitas.

ABSTRACT

values that are influenced by the structural and chemical characteristics of the material. The relationships among these parameters are complex and nonlinear, making them difficult to analyze using conventional approaches. In addition, previous studies have mainly focused on predicting Cs, while ESR prediction as a separate target remains limited. This study aims to develop and analyze an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) model for predicting Cs and ESR based on six activated carbon characterization parameters: specific surface area (SBET), pore volume (V_p), pore diameter (D_p), crystallite size, diffraction angle 2θ , and functional groups.

This study used a dataset consisting of 40 activated carbon samples. Two ANFIS models were developed separately to predict Cs and ESR. Each model used six input variables, two Generalized Bell Membership Functions (GbellMFs) for each input, 64 fuzzy rules, a hybrid learning method, and a maximum of 50 epochs. The models were evaluated using three testing-to-training data ratios of 1:1, 1:2, and 1:3. Model performance was evaluated using the Root Mean Square Error (RMSE). A sensitivity analysis based on changes in RMSE was also conducted to identify the input parameters that had the greatest influence on Cs and ESR predictions.

The results showed that the 1:3 testing-to-training ratio produced the best performance, with an RMSE of 10.55 F/g for Cs prediction and 0.1295 Ω for ESR prediction. In the Cs model, the highest sensitivity reached a Δ RMSE of 83.006 F/g, while SBET produced a Δ RMSE of 73.973 F/g. In the ESR model, crystallite size was the most sensitive parameter, with a Δ RMSE of 0.7164 Ω , followed by SBET with a Δ RMSE of 0.6321 Ω . These results demonstrate that each characterization parameter has a different influence on model performance. Overall, ANFIS successfully mapped the nonlinear relationships between activated carbon characteristics and supercapacitor performance and produced the lowest Cs and ESR prediction errors at the 1:3 data ratio.

Keywords: *supercapacitor, activated carbon, ANFIS, specific capacitance, Equivalent Series Resistance, sensitivity analysis.*

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
SURAT PERNYATAAN KARYA SENDIRI.....	iii
SURAT KETERANGAN HASIL <i>SIMILARITY</i>	iv
HALAMAN PENGESAHAN.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
HALAM PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vii
ABSTRAK	viii
<i>ABSTRACT</i>	ix
BAB I.....	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Penelitian.....	4
1.5 Metodologi penelitian	5
BAB II	7
TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Penelitian Terdahulu.....	7
2.2 Gap Penelitian Dibandingkan Penelitian Terdahulu.....	10
2.3 Superkapasitor: Konsep Dasar dan Kinerjanya.....	12
2.4 Karbon Aktif sebagai Material Elektroda.....	14
2.5 Parameter Karakterisasi Material	16
2.5.1 Karakterisasi Tekstural: BET (Brunauer-Emmett-Teller)	17
2.5.2 Karakterisasi Struktur Material: X-Ray Diffraction (XRD).....	18
2.5.3 Karakterisasi Gugus Fungsi: Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)	19
2.5.4 Karakterisasi	21
2.5.5 Integrasi Parameter Karakterisasi dalam Pemodelan	22
2.6 Parameter Elektrokimia.....	23
2.6.1 Kapasitansi Spesifik (Specific Capacitance, Cs)	24
2.6.2 Equivalent Series Resistance (ESR)	27

2.6.3	Hubungan Cs dan ESR terhadap Performa Superkapasitor	28
2.6.4	Relevansi terhadap Penelitian	29
2.7	Hubungan Karakterisasi dan Performa Elektrokimia	30
2.7.1	Pengaruh Luas Permukaan Spesifik (SBET)	30
2.7.2	Pengaruh Struktur Pori (V_p dan D_p)	31
2.7.3	Pengaruh Struktur Kristal dan Grafitisasi.....	31
2.7.4	Pengaruh Gugus Fungsi Permukaan	32
2.7.5	Interaksi Multi-Parameter dan Non-Linearitas.....	32
2.7.6	Implikasi terhadap Pemodelan ANFIS	33
2.8	Normalisasi data.....	33
2.9	Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS).....	35
2.9.1	Fuzzifikasi Input	37
2.10	Evaluasi kinerja model	44
BAB III		46
PERANCANGAN PENELITIAN		46
3.1	Rancangan Penelitian	46
3.2	Data dan variable penelitian	48
3.3	Skenario Pembagian Dataset	49
3.4	Evalusi membership function	49
3.5	Perancangan dan Konfigurasi Model ANFIS.....	50
3.6	Proses Testing dan Denormalisasi.....	53
3.7	Rancangan Eksperimen.....	53
3.8	Evaluasi RMSE	54
3.9	Evaluasi Kinerja Komputasi.....	54
3.10	Analisis Kompleksitas dan Konvergensi.....	55
BAB IV		56
HASIL DAN PEMBAHASAN		56
4.1	Hasil Perancangan Model ANFIS.....	56
4.2	Hasil Pelatihan Model ANFIS.....	59
4.3	Hasil Pengujian dan Prediksi Model ANFIS	63
4.4	Hubungan Parameter dan Pembahasan Hasil	72
BAB V.....		79
PENUTUP.....		79

5.1	Kesimpulan.....	79
5.2	Saran	80
DAFTAR PUSTAKA		81



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Diargaram ven penelitian.....	11
Gambar 2. 2 Prinsip kerja superkapasitor Lee et al. (2021).....	12
Gambar 2. 3 Morfologi karbon aktif (Sujiono et al., 2022).....	15
Gambar 3. 1 flow chart penelitian.....	47
Gambar 4. 1 Konvergensi Training Error Model ANFIS-Cs.....	60
Gambar 4. 2 Konvergensi Training Error Model ANFIS-ESR	62
Gambar 4. 3 Perbandingan Nilai Aktual dan Prediksi Cs	64
Gambar 4. 4 Perbandingan Nilai Aktual dan Prediksi ESR.....	65
Gambar 4. 5 Perbandingan Waktu Pelatihan Model ANFIS.....	67
Gambar 4. 6 Perbandingan Waktu Prediksi Model ANFIS.....	68
Gambar 4. 7 Pengaruh Pembagian Dataset terhadap RMSE Cs	72
Gambar 4. 8 Pengaruh Pembagian Dataset terhadap RMSE ESR.....	73
Gambar 4. 9 Surface Plot Hubungan Parameter terhadap Prediksi Cs.....	74
Gambar 4. 10 Surface Plot Hubungan Parameter terhadap Prediksi ESR	74
Gambar 4. 11 Pengaruh Masing-Masing Parameter terhadap RMSE Cs	75
Gambar 4. 12 Pengaruh Masing-Masing Parameter terhadap RMSE ESR.....	76

UNIVERSITAS
MERCU BUANA

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Ringkasan Penelitian Terdahulu	8
tabel 2. 2 Hubungan Teknik Karakterisasi dengan Parameter Input Penelitian.....	22
Tabel 3. 1 Variabel Penelitian.....	48
Tabel 3. 2 Skenario Pembagian Dataset.....	49
Tabel 3. 3 Konfigurasi Perancangan dan Pelatihan Model ANFIS	52
Tabel 3. 5 Rancangan Eksperimen	53
Tabel 4. 1 Hasil Pembentukan Struktur ANFIS pada MATLAB.....	57
Tabel 4. 2 Perbandingan RMSE Model ANFIS.....	66
Tabel 4. 3 Hasil Prediksi Cs dan ESR pada Seluruh Sampel.....	69
Tabel 4. 4 Hasil Sensitivitas Parameter pada Model ANFIS-Cs	76
Tabel 4. 5 Hasil Sensitivitas Parameter pada Model ANFIS-ESR.....	77

