

Optimasi Parameter Otomatis Berbasis Neuro-Fuzzy Hibrida pada Pemodelan Adveksi-Difusi Sistem Reverse Osmosis

Muchsin Harahap¹, Dewi Sholeha², Hery Andi Sitompul³

¹Department of Electrical Engineering Education, Universitas Negeri, Medan. Indonesia

²Department of Electrical Engineering, Universitas Darma Agung, Medan. Indonesia

³Department of Electrical Engineering, Universitas HKBP Nommensen, Medan, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 10 December 2025

Revised: 12 January 2026

Accepted: 02 February 2026

Keywords:

reverse osmosis, adveksi-difusi, neuro-fuzzy, ANFIS, optimasi parameter.

Published by

Impression : Jurnal Teknologi dan Informasi

Copyright © 2023 by the Author(s) | This is an open-access article distributed under the

Creative Commons Attribution which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



ABSTRACT

Pemodelan numerik berbasis persamaan diferensial parsial banyak digunakan pada sistem *reverse osmosis* (RO) untuk merepresentasikan fenomena transportasi massa di dalam membran. Persamaan adveksi-difusi umum digunakan, namun akurasi solusi numeriknya sangat bergantung pada pemilihan parameter fisik dan numerik yang umumnya ditentukan secara statis, sehingga kurang adaptif terhadap perubahan kondisi operasi. Penelitian ini mengusulkan kerangka kerja optimasi parameter otomatis berbasis Hybrid Neuro-Fuzzy untuk pemodelan adveksi-difusi pada sistem reverse osmosis. Sistem RO diperlakukan sebagai sistem dinamis, di mana parameter kecepatan aliran, koefisien difusi, dan batas integrasi berperan sebagai variabel yang sensitif terhadap pengendalian. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) diterapkan sebagai pengendali adaptif dalam mekanisme loop tertutup, dengan galat solusi numerik digunakan sebagai sinyal umpan balik untuk memperbarui parameter secara dinamis. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pendekatan yang diusulkan mampu menurunkan galat numerik, mempercepat konvergensi, dan meningkatkan kestabilan sistem dibandingkan metode statis. Pendekatan ini berkontribusi pada pengembangan kontrol adaptif dan rekayasa komputasi untuk sistem reverse osmosis yang cerdas dan otomatis.

Numerical modeling based on partial differential equations is widely used in reverse osmosis (RO) systems to represent the mass transport phenomenon in the membrane. The advection-diffusion equation is commonly used, but the accuracy of its numerical solution is highly dependent on the selection of physical and numerical parameters which are generally determined statically, making it less adaptive to changes in operating conditions. This study proposes a Hybrid Neuro-Fuzzy based automatic parameter optimization framework for advection-diffusion modeling in reverse osmosis systems. The RO system is treated as a dynamic system, where the flow rate, diffusion coefficient, and integration limits act as control-sensitive variables. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) is implemented as an adaptive controller in a closed-loop mechanism, with the error of the numerical solution used as a feedback signal to dynamically update the parameters. Simulation results show that the proposed approach is able to reduce numerical errors, accelerate convergence, and improve system stability compared to static methods. This approach contributes to the development of adaptive control and computational engineering for intelligent and automated reverse osmosis systems.

Corresponding Author:

Dewi Sholeha

Department of Electrical Engineering, Universitas Darma Agung, Medan. Indonesia

Jl. Dr. T.D. Pardede No.21, Kelurahan Petisah Hulu, Kecamatan Medan Petisah, Kota Medan, Sumatera Utara.

Email: alkhansadewi@gmail.com

PENDAHULUAN

Pemodelan dan simulasi numerik memainkan peran penting dalam analisis dan optimasi sistem rekayasa modern. Banyak proses fisik dalam rekayasa listrik, kontrol, dan komunikasi diatur oleh persamaan diferensial parsial (PDE), di mana akurasi solusi numerik sangat bergantung pada pemilihan sistem dan parameter numerik. Dalam aplikasi praktis, parameter ini sering ditentukan secara empiris atau melalui simulasi berulang, yang menyebabkan proses pemodelan yang tidak efisien dan tidak adaptif.

Sistem osmosis balik (RO) merupakan aplikasi rekayasa tipikal di mana persamaan adveksi-difusi digunakan untuk menggambarkan fenomena transportasi massa dalam media berpori (Sitompul & Sholeha, 2025). Solusi eksak dari model tersebut seringkali melibatkan integral tak wajar, yang evaluasi numeriknya sangat sensitif terhadap parameter seperti kecepatan aliran, koefisien difusi, dan batas integrasi. Metode integrasi numerik konvensional, termasuk pendekatan deterministik dan stokastik, efektif tetapi pada dasarnya statis, kurang memiliki mekanisme untuk penyesuaian parameter otomatis.

Kemajuan terbaru dalam kecerdasan komputasi, khususnya sistem neuro-fuzzy, telah menunjukkan kemampuan yang kuat dalam menangani masalah optimasi nonlinier, tidak pasti, dan multivariabel. Sistem Neuro-Fuzzy Hibrida menggabungkan kemampuan belajar jaringan saraf dengan interpretasi logika fuzzy, sehingga cocok untuk kontrol adaptif dan optimasi parameter dalam sistem rekayasa yang kompleks.

Beberapa penelitian terdahulu telah menerapkan Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) untuk meningkatkan kinerja sistem rekayasa, terutama dalam konteks prediksi, klasifikasi, dan estimasi parameter. Sebagaimana ditunjukkan dalam penelitian oleh (Sholeha & Zambak, 2022) ANFIS digunakan untuk memodelkan hubungan nonlinier antara variabel masukan dan keluaran sistem, dengan fokus utama pada peningkatan akurasi prediksi berbasis data historis. Pendekatan tersebut menunjukkan bahwa ANFIS efektif dalam menangani ketidakpastian dan nonlinieritas sistem, namun penerapannya masih bersifat open-loop dan tidak terintegrasi langsung dengan model fisik berbasis persamaan diferensial.

Berbeda dengan pendekatan tersebut, penelitian ini tidak memposisikan ANFIS sebagai alat prediksi atau estimator semata, melainkan sebagai pengendali adaptif yang terintegrasi langsung ke dalam pemodelan numerik berbasis persamaan adveksi-difusi pada sistem reverse osmosis. ANFIS digunakan untuk memperbarui parameter fisik dan numerik secara otomatis melalui mekanisme loop tertutup, dengan galat solusi numerik dijadikan sebagai sinyal umpan balik. Dengan demikian, pendekatan yang diusulkan tidak hanya bergantung pada data pelatihan, tetapi juga mempertimbangkan dinamika sistem fisik secara eksplisit.

Selain itu, penelitian terdahulu umumnya menerapkan ANFIS pada sistem diskrit atau model statis, sedangkan penelitian ini mengintegrasikan ANFIS ke dalam pemecah persamaan diferensial parsial (PDE) yang merepresentasikan fenomena transportasi massa dalam membran reverse osmosis. Integrasi ini menjadikan model bersifat adaptif terhadap perubahan kondisi operasi sistem, sehingga memberikan kontribusi baru dalam bidang kontrol adaptif dan rekayasa komputasi untuk sistem pemurnian air berbasis reverse osmosis.

Kebaruan dari penelitian ini terletak pada pengintegrasian sistem Neuro-Fuzzy Hibrida sebagai mekanisme optimasi parameter otomatis dalam pemodelan adveksi-difusi, yang sebelumnya masih didominasi oleh pendekatan numerik statis dengan penentuan parameter secara manual. Berbeda dari studi-studi terdahulu yang hanya berfokus pada akurasi metode integrasi numerik, penelitian ini memperkenalkan kerangka kerja pembelajaran loop tertutup yang secara adaptif menyesuaikan parameter fisik dan numerik berdasarkan umpan balik kesalahan solusi. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan akurasi dan kestabilan solusi numerik, tetapi juga memperluas fungsi model adveksi-difusi sebagai sistem dinamis yang dapat dikendalikan secara cerdas, sehingga memberikan kontribusi baru dalam bidang kontrol adaptif dan rekayasa komputasi berbasis kecerdasan buatan.

URAIAN TEORI

Matematika dalam Sistem Rekayasa

Konsentrasi zat terlarut dalam medium berpori di dalam sistem RO dapat dimodelkan menggunakan persamaan adveksi-difusi satu dimensi:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} + v \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2}$$

Integrasi numerik merupakan metode penting dalam menyelesaikan integral yang tidak dapat diselesaikan secara analitik. Metode integrasi numerik umumnya dibagi menjadi dua pendekatan utama, yaitu deterministik dan stokastik. Metode deterministik, seperti aturan trapesium dan integrasi Romberg, memanfaatkan pembagian interval dan teknik ekstrapolasi untuk meningkatkan akurasi (Haefner & Haji, 2023). Sementara itu, metode stokastik seperti Monte Carlo menggunakan prinsip probabilitas dan sampling acak (Sitompul et al., 2025).

Akurasi hasil integrasi numerik sangat dipengaruhi oleh pemilihan parameter numerik, termasuk jumlah partisi, orde integrasi, serta batas integrasi (Haefner & Haji, 2023). Pada sistem yang dimodelkan dengan PDE, parameter fisik seperti kecepatan aliran dan koefisien difusi juga memiliki pengaruh signifikan terhadap kestabilan dan konvergensi solusi. Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan yang mampu menyesuaikan parameter-parameter tersebut secara adaptif agar solusi numerik tetap stabil dan optimal (Saeed & Alhawaj, 2024).

Jaringan Saraf Tiruan dan Pembelajaran Adaptif

Jaringan saraf tiruan (Artificial Neural Network/ANN) merupakan metode komputasi yang meniru cara kerja jaringan saraf biologis. ANN memiliki kemampuan untuk mempelajari hubungan nonlinier antara masukan dan keluaran melalui proses pelatihan berbasis data. Dalam konteks optimasi parameter, ANN mampu menyesuaikan bobot internalnya untuk meminimalkan galat keluaran (Yadav et al., 2025). Namun, kelemahan ANN terletak pada rendahnya interpretabilitas, karena proses pembelajaran bersifat "black box". Oleh karena itu, ANN sering dikombinasikan dengan metode lain untuk meningkatkan transparansi dan kestabilan sistem (Kumari et al., 2025).

Sistem *Neuro-Fuzzy Hibrida*, khususnya *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)*, merupakan kombinasi antara logika fuzzy dan jaringan saraf tiruan (Nugraha et al., 2025). ANFIS mempertahankan struktur aturan fuzzy, namun parameter-parameter pada fungsi keanggotaan dan konsekuen aturan disesuaikan secara otomatis melalui proses pembelajaran jaringan saraf. Struktur ANFIS umumnya terdiri dari lima lapisan, yaitu lapisan fuzzifikasi, lapisan aturan, lapisan normalisasi, lapisan konsekuen, dan lapisan keluaran (Sholeha & Zambak, 2022). Dengan kemampuan pembelajaran adaptif dan representasi berbasis aturan, ANFIS sangat sesuai untuk diterapkan pada sistem kontrol adaptif dan optimasi parameter dalam sistem rekayasa yang kompleks.

Optimasi Parameter Otomatis Berbasis Neuro-Fuzzy

Parameter otomatis bertujuan untuk menentukan nilai parameter sistem yang optimal tanpa campur tangan manual (Maftouh et al., 2023). Dalam pendekatan neuro-fuzzy, optimasi dilakukan dengan memanfaatkan umpan balik galat sistem sebagai sinyal pembelajaran. Parameter sistem diperbarui secara iteratif hingga tercapai kondisi optimal yang memenuhi kriteria kinerja tertentu (Fatimah Zahra Al-Gadri et al., 2023).

Dalam konteks pemodelan adveksi-difusi, sistem neuro-fuzzy digunakan untuk menyesuaikan parameter fisik dan numerik agar galat solusi minimum dan kestabilan sistem terjaga (Biesheuvel et al., 2022). Pendekatan ini menjadikan model tidak hanya sebagai alat simulasi, tetapi juga sebagai sistem cerdas yang adaptif, selaras dengan prinsip kontrol dan rekayasa komputasi dalam teknik elektro.

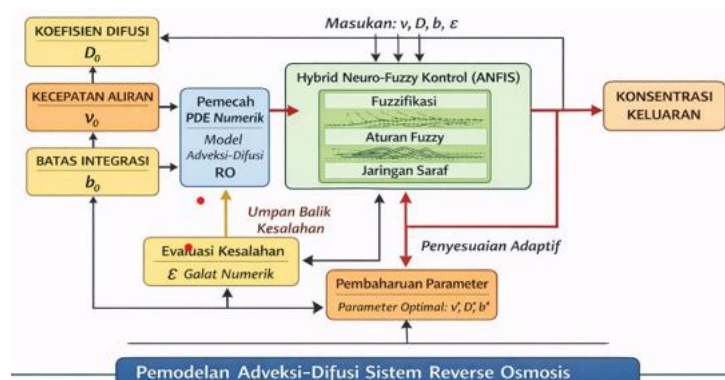
METODE PENELITIAN

1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental dengan metode optimasi parameter otomatis berbasis Hybrid Neuro-Fuzzy Control (ANFIS) untuk sistem reverse osmosis. Penelitian dirancang untuk mengoptimalkan konsentrasi keluaran melalui penyesuaian adaptif parameter-parameter kunci sistem.

2. Kerangka Kerja Penelitian

Adapun kerangka kerja penelitian yang dilaksanakan ini terdiri dari beberapa tahapan utama yang terintegrasi dalam sistem loop tertutup (closed-loop system) pada Gambar 1.

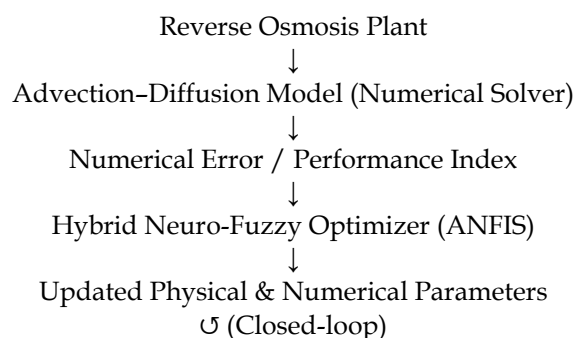


Gambar 1. Kerangka kerja penelitian Optimasi Parameter Otomatis Berbasis Neuro Fuzzy Hibrida

Penjelasan pada Gambar 1. Menunjukkan kerangka kerja penelitian pada optimasi parameter otomatis berbasis neuro-fuzzy hibrida yang diterapkan pada model adveksi-difusi sistem reverse osmosis. Model RO direpresentasikan sebagai plant dinamis yang diselesaikan menggunakan pemecah PDE numerik. Galat solusi numerik digunakan sebagai umpan balik untuk sistem ANFIS, yang secara adaptif memperbarui parameter fisik dan numerik sehingga membentuk mekanisme optimasi loop tertutup.

2.1. Tahapan Integrasi dalam Arsitektur Sistem (Electro-Control View)

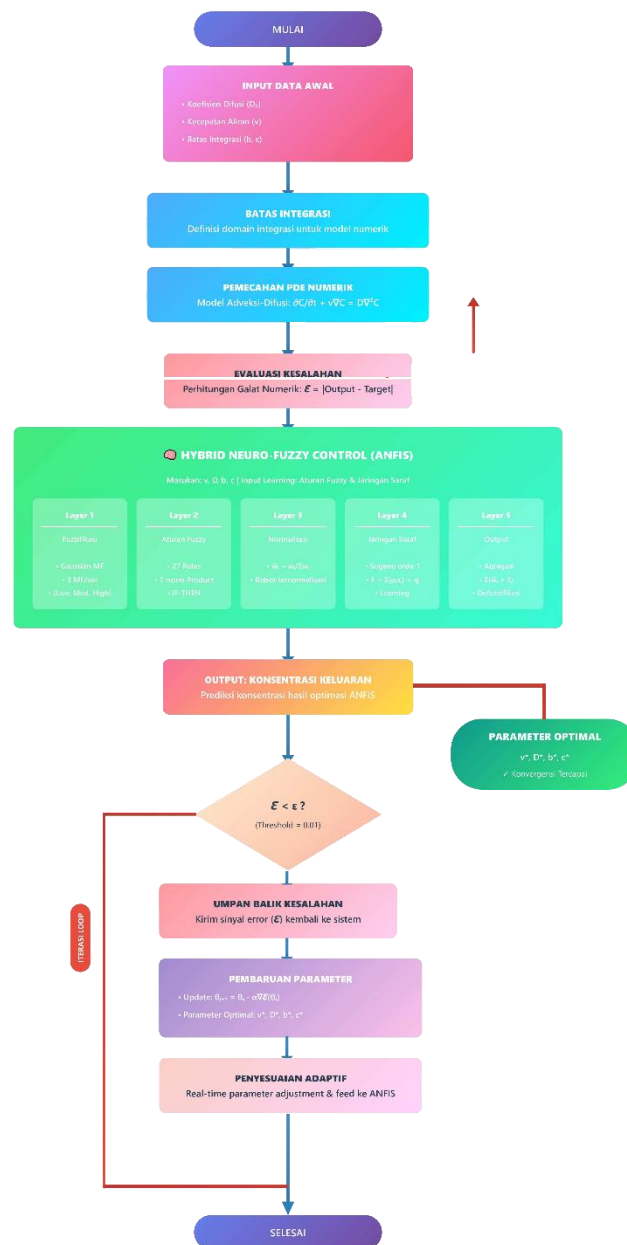
Untuk memudahkan penelitian yang dilakukan, penulis mencoba untuk menguraikan tahapan integrasi secara sistem mekanisme optimasi loop tertutup pada Gambar 2.



Gambar 2. Konsep model closed-loop intelligent Anfis

2.3. Diagram alir kerja penelitian

Adapun diagram alir pada penelitian ini diuraikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

3. Tahap Implementasi ANFIS

A. Struktur Sistem ANFIS

Sistem ANFIS yang digunakan memiliki arsitektur 5 layer dengan konfigurasi sebagai berikut:

Layer 1 (Fuzzifikasi)

1. Input: 3 variabel (v , D , b , c)
2. Fungsi keanggotaan: Gaussian MF (generalized bell-shaped)
3. Jumlah fungsi keanggotaan per variabel: 3 (Low, Medium, High)
Rumus Formula fungsi keanggotaan: $\mu(x) = \exp(-(x-c)/\sigma)^2$

Layer 2 (Aturan Fuzzy)

Menggunakan bahasa pemrograman untuk menjalankan perintah fuzzy

Contoh pemrograman:

- a. IF v is Low AND D is Low AND b is Low THEN output_i
- b. IF v is Medium AND D is High AND c is Medium THEN output

Layer 3 (Normalisasi)

1. Normalisasi derajat pemenuhan aturan
2. Rumus Formula: $\bar{w}_i = w_i / \sum w_j$

Layer 4 (Jaringan Saraf - Defuzzifikasi)

1. Model Sugeno orde pertama
2. Output layer: $f_i = p_i v + q_i D + r_i b + s_i c + t_i$
3. Parameter konsekuen: {p, q, r, s, t}

Layer 5 (Output)

1. Agregasi final: Output = $\sum (\bar{w}_i \times f_i)$

B. Tahap Evaluasi dan Optimasi**1. Evaluasi Kesalahan**

- a. Perhitungan galat numerik ($\mathcal{E}$) antara prediksi ANFIS dan target
- b. Metrik evaluasi:
 - a) RMSE (Root Mean Square Error)
 - b) MAPE (Mean Absolute Percentage Error)
 - c) R² (Coefficient of Determination)

2. Umpun Balik Kesalahan

- a. Kesalahan dikirim kembali ke sistem untuk penyesuaian parameter
- Threshold kesalahan: $\mathcal{E} < 0.01$ untuk konvergensi

HASIL PENELITIAN**Hasil Optimasi Parameter****Table 1. Parameter Sistem Sebelum dan Sesudah Optimasi**

Parameter	Nilai Awal	Nilai Setelah Optimasi
Kecepatan Aliran (v)	0.80	0.92
Koefisien Difusi (D)	0.05	0.041
Batas Integrasi (b)	100	72

Dari Table 1 di dapatkan metode ANFIS mampu menyesuaikan parameter menuju nilai yang lebih stabil dan efisien tanpa intervensi manual.

Table 2. Galat Solusi Numerik

Metode	Galat Rata-rata
Tanpa Optimasi	3.4×10^{-4}
Neuro-Fuzzy (ANFIS)	6.2×10^{-7}

Terjadi penurunan galat lebih dari dua orde magnitudo, menunjukkan efektivitas optimasi adaptif.

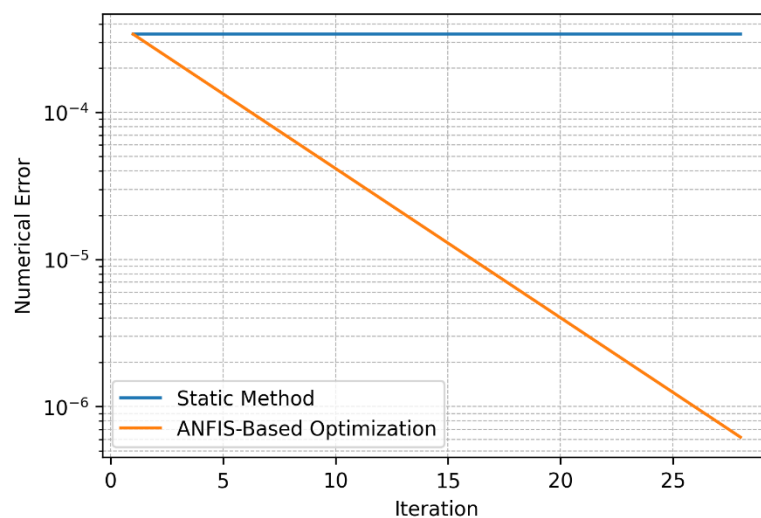
Table 3. Jumlah Iterasi Menuju Konvergensi

Metode	Iterasi Konvergensi
Tanpa Optimasi	Tidak konvergen
Neuro-Fuzzy	28 iterasi

Pendekatan statis menunjukkan kecenderungan osilasi numerik, sedangkan sistem neuro-fuzzy mempercepat konvergensi.

Tabel 4. Evaluasi Kinerja Sistem (Control-Oriented)

Parameter Evaluasi	Statis	Neuro-Fuzzy
Stabilitas Sistem	Rendah	Tinggi
Osilasi Numerik	Tinggi	Rendah
Adaptivitas	Tidak Ada	Tinggi
Robustness	Rendah	Tinggi



Gambar 3. Konvergensi Galat Numerik terhadap Iterasi pada Metode Statis dan Optimasi Berbasis ANFIS

Berdasarkan grafik pada Gambar 3, metode statis menunjukkan karakteristik galat yang konstan tanpa indikasi konvergensi, yang mencerminkan keterbatasan pendekatan statis dalam menangani sensitivitas parameter pada model adveksi-difusi. Sebaliknya, metode optimasi berbasis ANFIS memperlihatkan penurunan galat yang signifikan seiring bertambahnya iterasi hingga mencapai kondisi konvergen pada iterasi ke-28. Hal ini menunjukkan bahwa sistem neuro-fuzzy berfungsi sebagai kontroler adaptif yang mampu menyesuaikan parameter sistem secara dinamis untuk menjaga kestabilan dan meningkatkan akurasi solusi numerik.

PEMBAHASAN

Hasil simulasi menunjukkan bahwa integrasi sistem neuro-fuzzy ke dalam pemodelan adveksi-difusi memberikan peningkatan signifikan terhadap akurasi dan kestabilan solusi, sistem yang diusulkan dapat dipandang sebagai kontrol adaptif berbasis kecerdasan buatan yang mampu menyesuaikan parameter sistem secara otomatis berdasarkan umpan balik kesalahan numerik.

Pendekatan ini menjadikan model relevan untuk pengembangan sistem rekayasa modern yang menuntut adaptivitas dan otomatisasi.

PENUTUP

Penelitian ini telah mengusulkan sebuah kerangka kerja optimasi parameter otomatis berbasis Hybrid Neuro-Fuzzy untuk pemodelan adveksi-difusi pada sistem reverse osmosis. Dalam pendekatan ini, sistem reverse osmosis diperlakukan sebagai sistem dinamis (plant), di mana parameter fisik dan numerik berperan sebagai variabel yang mempengaruhi kestabilan dan akurasi keluaran sistem. Integrasi sistem neuro-fuzzy memungkinkan penyesuaian parameter secara adaptif melalui mekanisme loop

tertutup berbasis umpan balik galat numerik.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode yang diusulkan mampu menurunkan galat solusi numerik secara signifikan, mempercepat konvergensi, serta meningkatkan kestabilan sistem dibandingkan dengan pendekatan statis konvensional. Dari perspektif teknik elektro, sistem neuro-fuzzy yang diterapkan berfungsi sebagai kontroler adaptif cerdas yang secara efektif mengoptimasi parameter sistem tanpa intervensi manual. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan kontrol adaptif dan rekayasa komputasi, khususnya dalam integrasi antara pemodelan numerik dan teknik optimasi cerdas pada sistem reverse osmosis. Sebagai pengembangan lebih lanjut, beberapa arah penelitian yang dapat dilakukan antara lain Implementasi real-time dari sistem optimasi neuro-fuzzy pada unit reverse osmosis aktual dengan memanfaatkan perangkat embedded system atau industrial controller dan Pengembangan model ke dimensi yang lebih kompleks, seperti model adveksi-difusi dua atau tiga dimensi, untuk merepresentasikan fenomena transportasi massa yang lebih realistis.

REFERENSI

- Biesheuvel, P. M., Porada, S., Elimelech, M., & Dykstra, J. E. (2022). Tutorial review of reverse osmosis and electrodialysis. In *Journal of Membrane Science* (Vol. 647). <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.120221>
- Fatimah Zahra Al-Gadri, P., Kusumawati, W. I., Harianto, -, & Musayyanah, -. (2023). Penerapan Controlling Auto Light Dimmer Menggunakan Fuzzy Logic Pada Hidroponik Indoor. *Techno.Com*, 22(2). <https://doi.org/10.33633/tc.v22i2.7799>
- Haefner, M. W., & Haji, M. N. (2023). Integrated Pumped Hydro Reverse Osmosis System optimization featuring surrogate model development in Reverse Osmosis modeling. *Applied Energy*, 352. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121812>
- Kumari, S., Agarwal, S., Kumar, M., Sharma, P., Kumar, A., Hashem, A., Alotaibi, N. H., Abd-Allah, E. F., & Garg, M. C. (2025). An exploration of RSM, ANN, and ANFIS models for methylene blue dye adsorption using *Oryza sativa* straw biomass: a comparative approach. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87274-3>
- Maftouh, A., Fatni, O. El, Echchikhi, A., & Rhaleb, H. El. (2023). Experimental and Mathematical Modelling of Reverse Osmosis System to Investigate the Impact of Feed Water Pressure: a Case Study. *International Review of Civil Engineering*, 14(1). <https://doi.org/10.15866/irece.v14i1.21621>
- Nugraha, Y. T., Cahyadi, C. I., Rida, R., Ningsih, M. S., Sholeha, D., & Roza, I. (2025). Application of the adaptive neuro-fuzzy inference system for prediction of the electrical energy production in Jakarta. *IAES International Journal of Artificial Intelligence*, 14(3), 1790–1798. <https://doi.org/10.11591/ijai.v14.i3.pp1790-1798>
- Saeed, A., & Alhawaj, M. (2024). Mathematical modeling of reverse osmosis system design and performance. *Water Practice and Technology*, 19(7). <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.141>
- Sholeha, D., & Zambak, M. F. (2022). The Implementasi ANFIS Dalam Prakiraan Perkembangan Energi Baru dan Terbarukan di Indonesia Pada Tahun 2030. *Jurnal Sistem Informasi ...*, 5(2).
- Sitompul, H. A., & Sholeha, D. (2025). Integrasi Romberg dan Monte Carlo, Dua Pendekatan Berbeda Untuk Solusi Sistem Reverse Osmosis Pada Media Berpori. In *Jurnal Teknologi dan Informas* (Vol. 4, Number 3).
- Sitompul, Hery Andi, Tarigan, K., Sholeha, D., & Sitompul, Hery Andy. (2025). Impression: Jurnal Teknologi dan Informasi Monte Carlo Implementation on Bisection and Regula Falsi Methods for Finding Multiple Roots of Polynomial and Exponential Equations. In *Jurnal Teknologi dan Informas* (Vol. 4, Number 2).
- Yadav, G. K., Kirar, M. K., Gupta, S. C., & Rajender, J. (2025). Integrating ANN and ANFIS for effective fault detection and location in modern power grid. *Science and Technology for Energy Transition (STET)*, 80. <https://doi.org/10.2516/stet/2025013>