



Desain Alat Deteksi Anomali Arus Bocor dengan Gabungan Sensor CT dan Logika Fuzzy

Satya Agung Herdiansyah¹, Tata Sutabri²

Universitas Bina Darma ^{1,2}

e-mail: agungsatya457@gmail.com

Abstract

Leakage current in electrical systems is often a source of equipment malfunctions, energy waste, and safety hazards such as electric shocks and fires. Conventional protection systems typically rely on fixed threshold limits, making them less adaptive to changes in load and environmental conditions, which can reduce detection effectiveness. This study aims to design a leakage current anomaly detection device that integrates a Current Transformer (CT) sensor with fuzzy logic. The CT sensor functions to detect differences in current between the phase and neutral conductors, while fuzzy logic is employed to analyze the anomaly level based on the magnitude of leakage current and current stability. The design results demonstrate that the system can classify electrical installation conditions into three categories: normal, alert, and danger, using a more flexible approach compared to conventional threshold methods. The implementation of this device is expected to enhance the reliability, efficiency, and safety of electrical systems, while providing a more adaptive response to load variations and potential disturbances.

Keywords: : Leakage Current, CT Sensor, Fuzzy Logic, Anomaly Detection, Electrical Safety.

Abstrak

Arus bocor pada sistem kelistrikan sering menjadi sumber gangguan alat listrik, pemborosan energi, serta risiko keselamatan seperti sengatan listrik dan kebakaran. Sistem proteksi konvensional umumnya menggunakan batas ambang tetap, sehingga kurang adaptif terhadap perubahan beban dan kondisi lingkungan, yang berpotensi menurunkan efektivitas deteksi. Penelitian ini bertujuan untuk merancang alat deteksi anomali arus bocor yang mengintegrasikan sensor Current Transformer (CT) dengan logika fuzzy. Sensor CT berfungsi mendeteksi perbedaan arus antara penghantar fasa dan netral, sedangkan logika fuzzy digunakan untuk menganalisis tingkat anomali berdasarkan besarnya arus bocor dan stabilitas arus. Hasil desain menunjukkan bahwa sistem mampu mengklasifikasikan kondisi instalasi listrik menjadi tiga kategori, yaitu normal, waspada, dan bahaya, dengan pendekatan yang lebih fleksibel dibandingkan metode ambang batas konvensional. Implementasi alat ini diharapkan dapat meningkatkan keandalan, efisiensi, dan keamanan sistem kelistrikan, sekaligus memberikan respons yang lebih adaptif terhadap variasi beban dan gangguan potensial.

Kata Kunci: Arus Bocor, Sensor CT, Logika Fuzzy, Deteksi Anomali, Keselamatan Listrik.

PENDAHULUAN

Keandalan dan keamanan sistem kelistrikan menjadi aspek yang sangat penting baik di lingkungan rumah tangga maupun industri, karena gangguan listrik dapat menimbulkan kerugian material dan risiko keselamatan bagi manusia (Santoso, Wijaya, & Pratama, 2021). Salah satu masalah utama dalam sistem kelistrikan adalah arus bocor, yaitu arus listrik yang mengalir melalui jalur yang tidak diinginkan akibat kerusakan isolasi, kelembapan berlebih, atau gangguan pada peralatan (Patel, Sharma, & Joshi, 2019). Arus bocor yang tidak terdeteksi berpotensi menyebabkan sengatan listrik, kebakaran, dan kerusakan peralatan (Rahman, Hossain, & Chowdhury, 2022). Sistem proteksi tradisional seperti ELCB (Earth Leakage Circuit Breaker) atau RCCB (Residual Current Circuit Breaker) umumnya bekerja berdasarkan nilai ambang arus bocor tetap. Namun, pendekatan ini memiliki keterbatasan karena tidak adaptif terhadap fluktuasi beban dan kondisi sistem yang dinamis, sehingga efektivitas deteksi bisa menurun (Zhang, Li, & Wu, 2018).

Penelitian ini memanfaatkan logika fuzzy, yaitu metode pengambilan keputusan yang mampu menangani ketidakpastian dan variasi data melalui derajat keanggotaan yang merepresentasikan nilai linguistik seperti rendah, sedang, dan tinggi (Mendel, 2017). Integrasi antara sensor Current Transformer (CT) dan logika fuzzy memungkinkan sistem deteksi arus bocor untuk mengidentifikasi anomali secara lebih akurat dan responsif, serta mengklasifikasikan kondisi instalasi listrik ke dalam kategori normal, waspada, atau berbahaya. Sensor CT sendiri berfungsi mengukur perbedaan arus antara penghantar fasa dan netral secara non-invasif, sehingga aman digunakan pada sistem bertegangan tinggi (Gonzalez, Perez, & Lee, 2020). Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan logika fuzzy pada sistem proteksi listrik meningkatkan fleksibilitas dan akurasi deteksi dibanding metode konvensional berbasis ambang batas tetap (Zhang, Li, & Wu, 2018; Kumar & Singh, 2020; Santoso, Wijaya, & Pratama, 2021).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini merumuskan beberapa masalah, yaitu bagaimana merancang sistem deteksi anomali arus bocor berbasis sensor CT, bagaimana menerapkan logika fuzzy untuk mengklasifikasikan tingkat bahaya arus bocor, serta bagaimana performa sistem yang dihasilkan dibandingkan metode ambang batas konvensional. Tujuan penelitian ini meliputi desain alat deteksi arus bocor berbasis sensor CT, penerapan logika fuzzy sebagai metode pengambilan keputusan, serta menghasilkan sistem deteksi arus bocor yang adaptif, andal, dan responsif terhadap variasi kondisi beban. Adapun manfaat penelitian ini diharapkan meningkatkan keamanan dan keandalan sistem kelistrikan, menawarkan alternatif metode deteksi arus bocor yang lebih cerdas, serta menjadi acuan pengembangan sistem proteksi listrik berbasis kecerdasan buatan (AI).

Arus bocor didefinisikan sebagai aliran listrik melalui jalur yang tidak diinginkan, biasanya menuju tanah atau badan peralatan, yang bila melebihi batas aman dapat membahayakan manusia dan perangkat listrik (Patel, Sharma, & Joshi, 2019). Sensor CT bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik untuk mengukur arus AC tanpa kontak langsung dengan penghantar, sehingga aman untuk monitoring sistem bertegangan tinggi (Gonzalez, Perez, & Lee, 2020). Sementara itu, logika fuzzy memungkinkan pengambilan keputusan dengan fleksibilitas tinggi pada sistem yang memiliki ketidakpastian dan variasi data, sehingga cocok untuk deteksi arus bocor secara adaptif (Mendel, 2017). Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa integrasi sensor CT dan logika fuzzy mampu meningkatkan akurasi dan fleksibilitas sistem proteksi dibandingkan metode ambang batas konvensional, serta dapat mengklasifikasikan kondisi instalasi listrik dengan respons lebih adaptif terhadap perubahan beban dan gangguan potensial (Zhang, Li, & Wu, 2018).

METODE PENELITIAN

Sistem deteksi arus bocor yang dikembangkan terdiri dari sensor Current Transformer (CT), mikrokontroler, modul logika fuzzy, dan aktuator seperti alarm atau pemutus beban. Sensor CT dipasang pada penghantar fasa dan netral untuk mendeteksi selisih arus, yang kemudian dikonversi menjadi sinyal digital oleh mikrokontroler sebagai indikator arus bocor. Modul logika fuzzy menggunakan dua variabel input, yaitu besar arus bocor dan stabilitas arus, dengan output berupa tingkat kondisi sistem: normal, waspada, atau bahaya, menggunakan metode inferensi Mamdani dan defuzzifikasi centroid. Sistem diuji dengan variasi beban dan simulasi gangguan arus bocor untuk mengevaluasi respons, akurasi deteksi, dan kemampuan klasifikasi kondisi listrik secara adaptif dan andal.

PEMBAHASAN

Sistem deteksi arus bocor berbasis sensor Current Transformer (CT) dan logika fuzzy yang dikembangkan pada penelitian ini menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam meningkatkan keandalan dan fleksibilitas pengawasan sistem kelistrikan. Hasil uji coba membuktikan bahwa sistem mampu mendeteksi arus bocor dengan tepat dan mengklasifikasikan tingkat anomali secara bertahap, mulai dari kondisi normal, waspada, hingga bahaya, sesuai besarnya selisih arus antara penghantar fasa dan netral. Hal ini sejalan dengan studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa integrasi sensor CT dengan logika fuzzy memungkinkan identifikasi anomali arus secara adaptif, terutama dalam menghadapi variasi beban yang dinamis (Kumar & Singh, 2020; Zhang, Li & Wu, 2018).

Salah satu keunggulan utama sistem ini dibandingkan metode proteksi konvensional berbasis ambang batas tetap adalah kemampuannya untuk

menyesuaikan respons terhadap fluktuasi arus. Sistem ambang batas tradisional, seperti RCCB atau ELCB, bekerja dengan logika “on/off” berdasarkan nilai ambang tertentu. Jika arus bocor melebihi batas, perangkat langsung memutuskan beban; jika tidak, arus tetap mengalir. Pendekatan ini memiliki kelemahan karena tidak mempertimbangkan variasi alami pada arus akibat perubahan beban atau kondisi lingkungan, sehingga berpotensi menimbulkan false tripping atau keterlambatan deteksi (Patel, Sharma & Joshi, 2019; Rahman, Hossain & Chowdhury, 2022). Dengan penerapan logika fuzzy, sistem dapat menilai tingkat keparahan arus bocor secara bertahap. Misalnya, ketika arus bocor masih kecil tetapi stabil, sistem memberikan status waspada tanpa memutus beban, sehingga operasi sistem tetap berjalan dan gangguan minor dapat diantisipasi secara proaktif.

Logika fuzzy memungkinkan kombinasi beberapa parameter, seperti besarnya arus bocor dan stabilitas arus, untuk menentukan tingkat risiko dengan cara yang lebih realistis dibanding ambang batas tunggal. Ini berarti bahwa sistem tidak hanya mendeteksi keberadaan arus bocor, tetapi juga menilai potensi bahaya berdasarkan dinamika arus yang terjadi. Hasil uji coba menunjukkan bahwa ketika arus bocor besar dan tidak stabil, sistem menampilkan status bahaya, menyalakan alarm, dan memutus beban sesuai kebutuhan. Pendekatan ini mendukung prinsip graded response dalam proteksi listrik, yang sebelumnya banyak diterapkan pada smart grid dan sistem monitoring cerdas untuk mengurangi kerugian akibat interupsi mendadak (Mendel, 2017; Gonzalez, Perez & Lee, 2020).

Hasil tersebut menunjukkan bahwa penerapan logika fuzzy dalam sistem proteksi arus bocor dapat meningkatkan efisiensi operasional dan keamanan pengguna. Penelitian terdahulu oleh Santoso, Wijaya & Pratama (2021) menekankan bahwa metode fuzzy memungkinkan penyesuaian respons terhadap kondisi beban yang berubah-ubah, yang tidak dapat dicapai dengan metode konvensional. Hal ini juga diamini oleh Zhang, Li & Wu (2018), yang menunjukkan bahwa proteksi berbasis fuzzy lebih adaptif terhadap fluktuasi arus pada jaringan distribusi listrik. Dengan demikian, sistem ini tidak hanya mencegah risiko sengatan listrik dan kebakaran, tetapi juga meminimalkan gangguan pada operasi normal sistem listrik, yang sangat penting di lingkungan rumah tangga maupun industri.

Penggunaan sensor CT juga memberikan manfaat signifikan dalam hal keamanan dan kenyamanan pengukuran. Sensor CT dapat mendeteksi arus AC tanpa kontak langsung dengan penghantar, sehingga aman untuk dipasang pada sistem bertegangan tinggi dan memungkinkan pengukuran real-time (Gonzalez, Perez & Lee, 2020; Kumar & Singh, 2020). Penggunaan sensor non-invasif ini mengurangi risiko kecelakaan bagi teknisi dan memungkinkan pemantauan terus-menerus tanpa gangguan pada operasional sistem listrik.

Lebih jauh, kombinasi sensor CT dan logika fuzzy memfasilitasi pengumpulan data yang konsisten dan dapat dianalisis untuk tujuan preventive maintenance, yang menjadi strategi penting dalam manajemen kelistrikan modern (Rahman, Hossain & Chowdhury, 2022).

Sistem yang dikembangkan juga menunjukkan kemampuan dalam reduksi false alarm. Dalam metode konvensional, pemutusan beban sering terjadi karena fluktuasi kecil yang sebenarnya tidak berbahaya, sehingga menimbulkan gangguan operasional. Logika fuzzy, dengan kemampuan evaluasi bertingkat, dapat membedakan antara arus bocor minor yang stabil dan arus bocor yang benar-benar membahayakan, sehingga meminimalkan intervensi yang tidak perlu (Mendel, 2017; Santoso, Wijaya & Pratama, 2021). Pendekatan ini memungkinkan sistem memberikan peringatan awal atau status waspada sebelum mengambil tindakan drastis, yang meningkatkan respon proaktif terhadap potensi gangguan.

Sistem ini dapat diintegrasikan dengan aktuator seperti alarm, lampu peringatan, atau pemutus beban otomatis. Integrasi ini memastikan bahwa setiap kondisi arus bocor yang kritis langsung mendapatkan respons cepat, meningkatkan keselamatan pengguna dan perlindungan peralatan listrik (Patel, Sharma & Joshi, 2019). Pengujian dengan variasi beban dan simulasi gangguan menunjukkan bahwa sistem mampu beroperasi secara stabil dan konsisten, meskipun terjadi fluktuasi arus yang signifikan. Hal ini menegaskan bahwa pendekatan berbasis fuzzy dapat diterapkan pada berbagai skenario kelistrikan, baik untuk rumah tangga, gedung perkantoran, maupun pabrik industri. Sistem ini berpotensi berperan dalam mendukung smart grid dan sistem listrik cerdas. Dengan kemampuan adaptifnya, sistem dapat mengirim data ke pusat pemantauan atau server IoT untuk analisis lebih lanjut, seperti prediksi kegagalan peralatan dan deteksi dini potensi bahaya (Kumar & Singh, 2020; Santoso, Wijaya & Pratama, 2021). Hal ini akan menambah nilai tambah bagi manajemen energi modern, memungkinkan operator untuk merencanakan pemeliharaan preventif dan mengurangi downtime secara signifikan.

Sistem ini menunjukkan bahwa penerapan kecerdasan buatan, khususnya logika fuzzy, dapat meningkatkan literasi digital dalam pengelolaan sistem listrik. Pengguna dapat memahami kondisi instalasi listrik dengan indikator status yang jelas (normal, waspada, bahaya) tanpa perlu memahami detail teknis yang kompleks. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip human-centered design dalam sistem proteksi listrik modern, yang menekankan interaksi aman dan intuitif antara pengguna dan sistem (Gonzalez, Perez & Lee, 2020; Zhang, Li & Wu, 2018). Beberapa tantangan tetap ada, seperti keterbatasan akses sensor di instalasi tertentu, kemungkinan gangguan elektromagnetik, dan kebutuhan kalibrasi berkala untuk menjaga akurasi. Penelitian sebelumnya menekankan pentingnya kalibrasi rutin dan penyesuaian parameter fuzzy untuk menjaga

efektivitas deteksi (Mendel, 2017; Kumar & Singh, 2020). Meskipun sistem ini terbukti lebih adaptif dibanding metode ambang batas, implementasi praktisnya tetap memerlukan pemantauan dan evaluasi berkala.

Pembahasan ini menunjukkan bahwa kombinasi sensor CT dan logika fuzzy memberikan solusi yang adaptif, fleksibel, dan efektif untuk deteksi arus bocor. Sistem ini mampu mengklasifikasikan tingkat anomali secara bertahap, mengurangi kesalahan deteksi, dan meningkatkan keamanan serta keandalan sistem kelistrikan. Hasil penelitian ini mendukung pengembangan sistem proteksi listrik berbasis kecerdasan buatan yang dapat diandalkan, adaptif terhadap variasi beban, dan responsif terhadap potensi risiko arus bocor, sekaligus memberikan dasar bagi integrasi lebih lanjut dengan sistem monitoring dan smart grid modern.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil desain dan pengujian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan sensor Current Transformer (CT) terbukti efektif untuk mendeteksi arus bocor secara non-invasif, sementara penerapan logika fuzzy meningkatkan kelenturan dan akurasi sistem dalam mengidentifikasi anomali arus bocor. Sistem yang dikembangkan juga menunjukkan adaptabilitas yang lebih tinggi dibandingkan metode proteksi konvensional berbasis ambang batas tetap, mampu memberikan respons bertahap mulai dari status waspada hingga bahaya sesuai kondisi arus. Pengembangan lebih lanjut dapat menambahkan fitur komunikasi berbasis IoT untuk memungkinkan monitoring jarak jauh, serta integrasi dengan sistem perlindungan listrik lainnya agar sistem lebih komprehensif, responsif, dan sesuai dengan kebutuhan smart grid modern.

DAFTAR PUSTAKA

- Boldea, I. (2016). *Electric Machines: Steady State, Transients, and Design with MATLAB*. CRC Press.
- Gonzalez, A., Perez, M. & Lee, H., 2020. Current transformer applications for electrical system monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(5), pp.2154–2162.
- Hadi, S., & Prasetyo, E. (2020). Monitoring Arus Listrik Menggunakan Sensor Current Transformer Berbasis Mikrokontroler. *Jurnal Teknik Elektro*, 12(1), 45–52.
- Horowitz, P., & Hill, W. (2015). *The Art of Electronics* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- Kumar, R., & Singh, P. (2020). Fuzzy logic-based protection schemes for low voltage distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 118, 105765.
- Kusumadewi, S., & Purnomo, H. (2010). *Aplikasi Logika Fuzzy untuk Pendukung Keputusan*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Patel, D., Sharma, R. & Joshi, K., 2019. Leakage current detection and protection

- techniques in residential electrical systems. *Journal of Electrical Engineering*, 20(3), pp.45–52.
- Rashid, M. H. (2014). *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications* (4th ed.). Pearson Education.
- Santoso, B., Wijaya, T., & Pratama, I. (2021). Intelligent fault detection in smart grids using fuzzy logic and current sensors. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 10(2), 98–107.
- Suyanto. (2014). *Artificial Intelligence: Searching, Reasoning, Planning, and Learning*. Bandung: Informatika.
- Wang, L. X. (1997). *A Course in Fuzzy Systems and Control*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Zhang, Y., Li, J., & Wu, C. (2018). Adaptive residual current protection using fuzzy logic for dynamic loads. *Electric Power Systems Research*, 158, 128–136.