

Sistem Deteksi *Arcing Fault* Berbasis Antena Sebagai Sensor Tegangan Pada Sistem *Catenary* Kereta Listrik

1st Fadillah Syofyan
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia

mellofyfadillah@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Ahmad Sugiana
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia

ahmadsugiana@telkomuniversity.ac.id

3rd Kharisma Bani Adam
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Bandung, Indonesia

kharismaadam@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Sistem *catenary* adalah komponen kritis dalam operasional kereta listrik yang berfungsi menyuplai daya listrik melalui kawat konduktor di atas rel. Salah satu gangguan yang sering terjadi pada sistem ini adalah *arcing fault*. Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan perancangan dan implementasi sistem deteksi *arcing fault* menggunakan antena sebagai sensor tegangan non-kontak pendeteksi perubahan medan listrik yang dihasilkan oleh fenomena *arcing*. Hasil pengujian dilakukan pada beberapa variasi jarak. Pada jarak 1 cm dan 3 cm, tingkat akurasi model sama yaitu 93.33%, jarak 5 cm sebesar 86.7%, jarak 7 cm dengan nilai akurasi 80%, dan terakhir jarak 8 cm dengan akurasi 73.33%, masing-masing jarak diuji sebanyak 50 sampel data dan diklasifikasikan menjadi dua kelas yaitu, normal dan *arcing*. Penelitian ini menunjukkan bahwa sensor tegangan akan mulai kehilangan sensitivitas terhadap perubahan medan listrik jika semakin jauh dari sumber *arcing*. Kombinasi sensor tegangan dengan algoritma *Decision Tree* merupakan solusi yang dapat diandalkan untuk deteksi dini *arcing fault* pada sistem *catenary* kereta listrik, dengan potensi implementasi untuk meningkatkan keselamatan dan keandalan operasional transportasi kereta listrik di Indonesia.

Kata kunci— *Arcing fault*, antena, sensor tegangan, *decision tree*, sistem *catenary*.

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Seiring meningkatnya kebutuhan transportasi massal di wilayah perkotaan, kereta listrik menjadi salah satu jenis transportasi yang umum dimanfaatkan karena efisiensi energi dan kapasitas angkutnya. Operasional kereta listrik sangat bergantung pada sistem suplai daya yang andal, salah satunya melalui sistem aliran atas atau *catenary*. Dalam proses operasionalnya, kebutuhan daya kereta listrik di *supply* oleh gardu traksi yang disalurkan melalui kawat konduktor pada sepanjang atas lintasan kereta, yang dikenal sebagai sistem *catenary* atau listrik aliran atas (LAA). Di Indonesia, sistem ini diterapkan pada kereta rel listrik (KRL) yang beroperasi di sejumlah kota besar, salah satunya Jakarta dan sekitarnya. Namun dalam operasionalnya, sering terjadi gangguan yang dikenal sebagai *arcing fault*. Meskipun memiliki keunggulan dalam efisiensi, sistem *catenary* tidak terlepas dari berbagai

gangguan kelistrikan, salah satunya adalah *arcing fault*. *Arcing fault* dapat terjadi ketika timbul percikan listrik yang tidak terkendali, hal ini dapat berdampak pada kerusakan komponen hingga sistem kelistrikan. Gangguan ini dapat menurunkan kualitas kontak listrik serta berpotensi mengganggu keselamatan dan keandalan operasional kereta. Oleh sebab itu, dibutuhkan sistem pendeteksian dini yang baik yang dapat mengidentifikasi busur api listrik secara cepat dan presisi. Penelitian ini akan menggunakan metode pengukuran tegangan dengan sensor tegangan berupa antena untuk mendeteksi perubahan dan fluktuasi tegangan akibat *arcing fault* yang terjadi pada kawat *trolley catenary*. Data tegangan yang diperoleh akan dianalisis menggunakan teknik pengolahan data dan analisis domain waktu maupun nilai tegangan untuk mengidentifikasi karakteristik serta pola tegangan dari *arcing fault*. Dari analisis yang didapatkan, diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang faktor penyebab dan dampak gangguan *arcing fault* pada sistem *catenary*. Selain itu, penelitian ini juga akan mengkaji berbagai faktor yang mempengaruhi terjadinya *arcing fault*, seperti kondisi lingkungan, kecepatan kereta, dan desain sistem *catenary*.

B. Tujuan

Penelitian ini dilakukan dengan mengukur tegangan *arcing fault* menggunakan antena sebagai sensor tegangan pada model sistem *catenary*. Data tegangan yang diperoleh kemudian dianalisis untuk mengidentifikasi karakteristik *arcing* pada kawat *trolley* kereta listrik. Selanjutnya, metode *machine learning* diterapkan untuk memproses dan mengklasifikasi data tersebut guna membedakan kondisi normal dan *arcing* secara akurat.

II. KAJIAN TEORI

A. Sistem Aliran Atas pada Kereta Listrik

Sistem aliran atas atau *overhead contact system* merupakan infrastruktur kelistrikan yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari gardu traksi menuju rangkaian kereta listrik melalui media konduktor yang dipasang di atas lintasan rel. Dalam praktik operasional, sistem ini dikenal sebagai sistem *catenary* dan menjadi solusi utama penyediaan daya pada kereta rel listrik di berbagai negara, termasuk Indonesia [2]. Konfigurasi sistem *catenary*

dirancang agar mampu mempertahankan kestabilan mekanis dan kelistrikan, dengan mempertimbangkan gaya tarik horizontal, perubahan suhu, serta interaksi dinamis antara kawat *trolley* dan pantograf. Kontak yang kontinu antara pantograf dan kawat *catenary* memungkinkan arus listrik mengalir secara konsisten ke motor traksi, sehingga mendukung operasional kereta listrik yang efisien dan ramah lingkungan [4].

B. Arcing Fault

Arcing fault merupakan gangguan kelistrikan yang ditandai oleh munculnya loncatan listrik tidak terkendali antara dua konduktor atau antara konduktor dan *ground*. Fenomena ini umumnya dipicu oleh degradasi isolasi, keausan material, atau kondisi lingkungan yang tidak ideal. Percikan listrik yang terjadi dapat menghasilkan temperatur tinggi dalam waktu singkat, sehingga berpotensi menyebabkan kerusakan peralatan serta menurunkan keandalan sistem kelistrikan. Pada sistem aliran atas kereta listrik, *arcing fault* dapat muncul akibat ketidaksempurnaan kontak antara pantograf dan kawat *trolley* [5]. Gangguan ini sering kali sulit dideteksi menggunakan proteksi konvensional karena durasinya yang singkat dan tidak selalu memicu arus gangguan yang besar. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan pendeteksian alternatif yang mampu menangkap karakteristik medan listrik atau tegangan yang berubah secara cepat akibat fenomena *arcing*.

C. Analisis Arus Busur pada Gangguan Arcing

Berdasarkan IEEE Std. 158-2002 terdapat persamaan untuk mendapatkan nilai arus busur api listrik [7]. Pada aplikasi sistem yang bertegangan <1000 V, berikut persamaan yang dapat diterapkan.

$$I_g I_a = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966V + 0,000526G + 0,5588V (\lg I_{bf}) - 0,00304G(\lg I_{bf}) [7]$$

Keterangan:

I_g	:	\log_{10}
I_a	:	Arus gangguan busur listrik (kA)
K	:	-0,153 (sistem terbuka) 0,097 (sistem tertutup)
I_{bf}	:	Nilai arus <i>bolting fault</i> pada gangguan tiga fasa (kA)
V	:	Voltase sistem (kV)
G	:	Jarak pemisah konduktor (mm)

D. Penggunaan Antena dalam Mendeteksi Tegangan

Antena dapat dimanfaatkan sebagai sensor tegangan non-kontak dengan memanfaatkan prinsip kopling kapasitif antara struktur antena dan konduktor bertegangan. Perubahan tegangan pada suatu penghantar akan memengaruhi distribusi medan listrik di sekitarnya, yang selanjutnya dapat diinduksikan sebagai sinyal tegangan pada antena. Pendekatan ini memungkinkan proses pengukuran dilakukan tanpa koneksi langsung ke sistem kelistrikan, sehingga meningkatkan aspek keselamatan dan fleksibilitas pemasangan sensor. Dalam konteks deteksi *arcing fault*, antena mampu menangkap fluktuasi medan listrik yang muncul secara tiba-tiba, sehingga dapat digunakan sebagai

indikator awal terjadinya gangguan pada sistem *catenary* [10].

E. Decision Tree

Decision Tree adalah algoritma klasifikasi model pembelajaran yang mengklasifikasikan data berdasarkan aturan keputusan dan struktur yang bertingkat. Setiap node pada model ini merepresentasikan proses pemilihan atribut dan nilai ambang tertentu, sedangkan node akhir menghasilkan keputusan klasifikasi [17]. Kelebihan yang utama dari *Decision Tree* terdapat pada potensinya dalam menangani data numerik secara sederhana serta kemudahan interpretasi hasil klasifikasi. Penelitian ini menggunakan *Decision Tree* untuk membedakan kondisi normal dan *arcing* berdasarkan karakteristik tegangan hasil pengukuran sensor antena. Untuk menentukan dataset (k) dan *threshold* (tk), *decision tree* menggunakan index terkecil dengan mencari pasangan (k , tk) yang paling kecil index-nya. Kita bisa menggunakan *Gini Index* atau *Entropy* dimana $p_{i,k}$ menyatakan rasio dari sampel-sampel training class k diantara sampel-sampel training keseluruhan yang sampai di node ke- i .

$$G_i = 1 - \sum_{k=1}^n p_{i,k}^2$$

Di mana:

n : Jumlah kelas dalam dataset

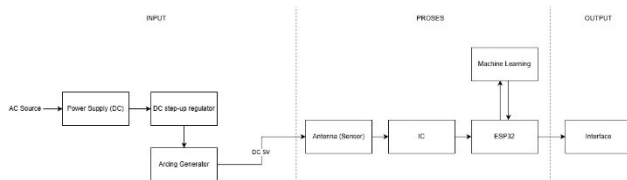
$p_{i,k}$: Proporsi sampel kelas k pada node i

F. Konsep Desain

Penelitian dirancang untuk menganalisis karakteristik tegangan *arcing fault* pada sistem *arcing fault* yang dibuat menggunakan antena sebagai sensor tegangan. Sistem bertujuan untuk mengetahui apakah sensor antena dapat mendeteksi *arcing fault* dengan baik. Komponen yang digunakan berupa antena khusus untuk mendeteksi perubahan tegangan yang dihasilkan oleh *arcing fault*. Terdapat pula rangkaian pengkondisian sensor yang bertujuan sebagai penguatan tegangan yang diterima oleh sensor antena. Sistem analisis data yang digunakan merupakan metode klasifikasi *Decision Tree* yang efektif dalam ruang dimensi tinggi serta, dapat menangani data yang kompleks dan memiliki banyak fitur, seperti sinyal dari antena.

G. Blok Diagram

Antena sebagai sensor akan menerima perubahan tegangan yang dihasilkan oleh *arcing fault*. Sinyal yang ditangkap umumnya memiliki amplitudo yang kecil sehingga pada tahap selanjutnya sinyal akan dilewatkan ke rangkaian penguat Op-Amp untuk memperkuat besarnya sinyal. Pada tahap pemrosesan, ESP32 sebagai mikrokontroler akan menghitung nilai voltase dari *arcing fault* tersebut. Data selanjutnya diproses menggunakan algoritma pemodelan yang telah diprogram dalam mikrokontroler untuk diklasifikasikan menjadi 2 kondisi data yaitu, normal atau *arcing*. Output dari proses klasifikasi akan ditampilkan melalui interface yang menunjukkan keterangan nilai tegangan serta kondisi sistem.



GAMBAR 1
Blok Diagram

III. METODE

Metode penelitian ini mencakup beberapa tahapan-tahapan sebagai berikut:

1. Studi Literatur: Melakukan proses pengumpulan informasi dan referensi dari sumber yang relevan seperti jurnal, artikel, penelitian terdahulu, dan situs internet yang berkaitan dengan Tugas Akhir.
2. Perancangan dan Implementasi: Merancang *hardware* dan *software* yang dibutuhkan. Menerapkan perancangan *hardware* dan dikonfigurasi dengan *software* terkait untuk menjalankan sistem secara keseluruhan.
3. Pengujian: Melaksanakan proses pengujian pada sistem yang telah dirancang dan mengumpulkan setiap data pengujian untuk dapat dianalisis lebih lanjut.
4. Analisis: Data yang didapatkan dari hasil pengujian, dianalisis lebih lanjut untuk mengevaluasi kinerja sistem.

Penelitian ini memiliki beberapa batasan yang perlu dipahami untuk memberikan fokus dan ruang lingkup yang jelas. Penelitian hanya memfokuskan pada karakteristik tegangan *arcing fault* yang dihasilkan oleh kawat *trolley catenary* tanpa mencakup jenis gangguan lain dalam sistem kelistrikan kereta. Deteksi *arcing fault* dilakukan menggunakan antenna sebagai pendeteksi sinyal elektromagnetik, tidak mencakup metode pendeteksi lain seperti sensor sinyal atau termal. Pemrosesan sinyal menggunakan teknik *machine learning* hanya mencakup algoritma klasifikasi *decision tree*, dengan analisis yang dilakukan pada data hasil pengukuran eksperimen. Penelitian ini tidak mencakup implementasi teknis penuh di lapangan, melainkan lebih pada pengembangan prototipe dan pengujian dalam skala eksperimen laboratorium. Batasan-batasan ini ditetapkan agar penelitian dapat dilaksanakan secara terfokus sesuai dengan sumber daya dan waktu yang tersedia.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

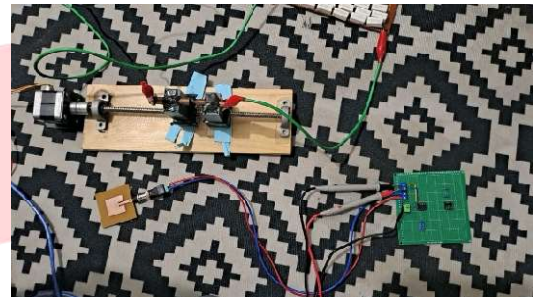
1. Pengujian Sensor Antena

Berdasarkan hasil pengujian sensor antena yang digunakan mendapatkan nilai rata-rata keberhasilan sebesar 94.2%. Variasi jarak ditentukan untuk mengukur jarak maksimum antena dapat mendeteksi loncatan listrik yang dihasilkan *arcing generator*. Dengan rata-rata keberhasilan tersebut maka, sensor antena yang digunakan sudah cukup baik menangkap perubahan

tegangan oleh *arcing*, semakin dekat posisi antena terhadap sumber *arcing*, maka semakin besar pula intensitas tegangan yang diterima.

2. Implementasi Sistem

Sistem telah dibangun dengan meletakkan antena dengan antena pada jarak tertentu dari *arcing* generator. Setelah sistem dinyalakan, *arcing* generator mulai bergerak dan menghasilkan *arcing* (loncatan listrik) sehingga dapat dibaca oleh antena yang berada di dekat *arcing* generator tersebut. Berikut dokumentasi rangkaian yang telah dibuat.



GAMBAR 2
Rangkaian Arcing Generator

3. Pengujian Implementasi Keseluruhan Sistem

Setelah melakukan pengambilan data dilakukan pengujian model. Seluruh metrik performa yang diperoleh, model Decision Tree menunjukkan hasil klasifikasi yang bervariasi, tergantung pada data yang dikumpulkan di setiap jarak pengukuran. Pada jarak 1 cm dan 3 cm, tingkat akurasi model sama, yaitu 93.33%. Selanjutnya, pada jarak 5 cm, model mencapai akurasi sebesar 86.7%, diikuti oleh jarak 7 cm dengan akurasi 80%, dan terakhir jarak 8 cm dengan akurasi 73.33%. Penurunan akurasi pada jarak 8 cm menunjukkan bahwa sensor tegangan mulai kehilangan sensitivitas terhadap perubahan medan listrik, sehingga kemampuan deteksi *arcing* menjadi kurang optimal.

V. KESIMPULAN

Sistem deteksi *arcing fault* yang dikembangkan menggunakan antena sebagai sensor tegangan dan algoritma *Decision Tree* sebagai metode klasifikasi telah menunjukkan performa yang sangat memuaskan. Berdasarkan pengujian terhadap 50 sampel data pada beberapa variasi jarak, sistem mencapai akurasi keseluruhan sebesar 93.33%, pada jarak 1 dan 3 cm. pada jarak 5 cm, model mencapai akurasi sebesar 86.7%, diikuti oleh jarak 7 cm dengan akurasi 80%, dan terakhir jarak 8 cm dengan akurasi 73.33%. Semakin jauh jarak sensor tegangan terhadap sumber *arcing* maka, semakin kecil pula sensitivitas sensor membaca nilai perubahan medan listrik yang terjadi akibat fenomena *arcing*. Penggunaan antena sebagai sensor tegangan memberikan keunggulan signifikan karena mampu menangkap perubahan tegangan tanpa memerlukan

kontak fisik dengan rangkaian listrik yang dimonitor, sehingga memberikan keamanan lebih tinggi bagi sistem *monitoring*. Metrik performa yang diperoleh menunjukkan kemampuan klasifikasi yang baik dengan akurasi 93.3% pada jarak 1 dan 3 cm, mengkonfirmasi bahwa sistem memiliki keseimbangan sangat baik antara kemampuan mendeteksi *arcing* dan mengenali kondisi normal. Hasil penelitian ini membuktikan bahwa kombinasi antena mikrostrip dengan algoritma *Decision Tree* merupakan solusi yang efektif, efisien, dan dapat diandalkan untuk deteksi dini *arcing fault* pada sistem *catenary* kereta listrik.

REFERENSI

- [1] H. Ahnap Alfiansyah and P. Oetomo, "STUDI TENTANG KELISTRIKAN PADA SISTEM KERETA REL LISTRIK."
- [2] G. Wu et al., "Pantograph–catenary electrical contact system of high-speed railways: recent progress, challenges, and outlooks," Dec. 01, 2022, Springer. doi: 10.1007/s40534-022-00281-2.
- [3] C. R. Hananto, "OPTIMASI PENEMPATAN GARDU TRAKSI LISTRIK ALIRAN ATAS (LAA) ANTARA STASIUN CEPER – STASIUN GAWOK BERDASARKAN PENURUNAN TEGANGAN UNTUK MENINGKATKAN KEANDALAN PASOKAN DAYA LISTRIK KRL," Publikasi Ilmiah, 2021.
- [4] Y. Song, F. Duan, and Z. Liu, "Analysis of Critical Speed for High-Speed Railway Pantograph-Catenary System," IEEE Trans Veh Technol, vol. 71, no. 4, pp. 3547–3555, Apr. 2022, doi: 10.1109/TVT.2021.3136920.
- [5] J. Inovtek and S. Elektro, "Penggunaan Fast Fourier Transform pada Identifikasi Arc Fault Pada Berbagai Jenis Kabel," vol. 2, no. 3, p. 2020.
- [6] L. Zhao, Y. Zhou, K. L. Chen, S. H. Rau, and W. J. Lee, "High-Speed Arcing Fault Detection: Using the Light Spectrum," IEEE Industry Applications Magazine, vol. 26, no. 3, pp. 29–36, May 2020, doi: 10.1109/MIAS.2019.2943664.
- [7] G. Wu et al., "Pantograph–catenary electrical contact system of high-speed railways: recent progress, challenges, and outlooks," Dec. 01, 2022, Springer. doi: 10.1007/s40534-022-00281-2.
- [8] I. Balasubramanian and A. M. Graham, "Impact of available fault current variations on arc-flash calculations," IEEE Trans Ind Appl, vol. 46, no. 5, pp. 1836–1842, Sep. 2010, doi: 10.1109/TIA.2010.2058083.
- [9] W. Yinghong and H. Weixing, "Research on electromagnetic compatibility of Chinese high speed railway system," Chinese Journal of Electronics, vol. 29, no. 1, pp. 16–21, 2020, doi: 10.1049/cje.2019.09.002.
- [10] F. Nugraha, U. Khayam, and T. Rhamdani, "View of OPTIMASI PARAMETER ANTENA DIPOLE SEBAGAI SENSOR DALAM MENDETEKSI PARTIAL DISCHARGE PADA ISOLASI GIS," Informatika dan Teknik Elektro Terapan, vol. 13, Apr. 2025.
- [11] X. Tan, W. Zhang, M. He, W. Li, G. Ao, and F. Zhou, "Non-Contact Adaptive Voltage Sensor Based on Electric Field Coupling Principle," Sensors, vol. 23, no. 19, Oct. 2023, doi: 10.3390/s23198316.
- [12] W. Zhang, Y. Yang, J. Zhao, R. Huang, K. Cheng, and M. He, "Research on a Non-Contact Multi-Electrode Voltage Sensor and Signal Processing Algorithm," Sensors, vol. 22, no. 21, Nov. 2022, doi: 10.3390/s22218573.
- [13] C. Suo, M. He, G. Zhou, X. Shi, X. Tan, and W. Zhang, "Research on Non-Invasive Floating Ground Voltage Measurement and Calibration Method," Electronics (Switzerland), vol. 12, no. 8, Apr. 2023, doi: 10.3390/electronics12081858.
- [14] K. Thakur et al., "Advancements in Arc Fault Detection for Electrical Distribution Systems: A Comprehensive Review from Artificial Intelligence Perspective," Nov. 2023, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2311.16804>
- [15] J. S. Bobowski, S. Ferdous, and T. Johnson, "Calibrated Single-Contact Voltage Sensor for High-Voltage Monitoring Applications," Jun. 2020, doi: 10.1109/TIM.2014.2360804.
- [16] T. M. . Mitchell, Machine Learning. McGraw-Hill, 1997.
- [17] B. Charbuty and A. Abdulazeez, "Classification Based on Decision Tree Algorithm for Machine Learning," Journal of Applied Science and Technology Trends, vol. 2, no. 01, pp. 20–28, Mar. 2021, doi: 10.38094/jastt20165.