

Pemodelan Matematis Dalam Penentuan Usia Pakai Dan Derating kHA Dari Kabel Listrik Dengan Pendekatan Aturan Arrhenius

Nursahar Buang^{1*}, Aryani Rombekila²

^{1,2}Program Studi Teknologi Rekayasa Instalasi Listrik, Politeknik Amamapare, JL. C Heatubun, Kwamki Baru, 99910, Kwamki, Kec. Mimika Baru, Kabupaten Mimika, Papua 99971.

*Corresponding Author

E-mail Address: nursaharbuang@gmail.com

ABSTRAK

Penentuan usia pakai dan kapasitas hantar arus (kHA) dari kabel listrik merupakan faktor krusial dalam menjaga keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Faktor-faktor lingkungan, seperti suhu operasi dan metode pemasangan, memiliki dampak signifikan terhadap usia pakai dan derating kHA. Dalam penelitian ini, dilakukan pemodelan matematis menggunakan persamaan Arrhenius untuk memprediksi usia pakai kabel dan menghitung derating kHA berdasarkan suhu lingkungan. Simulasi pemodelan ini diimplementasikan menggunakan MATLAB untuk mempermudah proses analisis dan visualisasi data. Pendekatan ini memberikan panduan penting dalam perencanaan dan pemeliharaan kabel listrik agar lebih efisien dan aman.

Kata Kunci : kabel listrik, pemodelan matematis, usia pakai, derating kHA, hukum Arrhenius, MATLAB

ABSTRACT

The determination of service life and current carrying capacity (CCC) of electrical cables is a crucial factor in maintaining the reliability of power distribution systems. Environmental factors, such as operating temperature and installation methods, significantly impact the service life and CCC derating. In this study, mathematical modeling using the Arrhenius equation was conducted to predict cable service life and calculate CCC derating based on environmental temperature. This modeling simulation was implemented using MATLAB to facilitate data analysis and visualization. This approach provides essential guidance in planning and maintaining electrical cables to ensure greater efficiency and safety.

Keywords: electrical cable, mathematical modeling, service life, CCC derating, Arrhenius law, MATLAB

PENDAHULUAN

Kabel listrik berperan sebagai komponen utama dalam sistem distribusi energi listrik dan transmisi tenaga listrik yang berfungsi untuk mengalirkan energi dari pembangkit menuju ke pengguna akhir, baik industri, komersial, maupun perumahan. Keandalan dan efisiensi kabel listrik memainkan peran yang sangat penting dalam memastikan pasokan energi tetap berjalan dengan aman dan lancar. Keandalan ini dipengaruhi oleh banyak faktor, termasuk kondisi lingkungan dan faktor-faktor internal pada kabel itu

sendiri, seperti suhu operasi, tegangan, material, serta metode pemasangan kabel. Salah satu parameter krusial dalam menilai keandalan kabel adalah usia pakai kabel dan kapasitas hantar arus (KHA). Usia pakai kabel listrik sangat tergantung pada kemampuan isolasi dalam menghadapi tegangan listrik dan suhu lingkungan. Apabila kabel listrik beroperasi pada suhu yang melebihi suhu desainnya, maka isolasi kabel akan mengalami degradasi lebih cepat. Proses degradasi isolasi kabel ini akan mengurangi umur kabel dan meningkatkan

risiko kegagalan sistem distribusi. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam mengenai pengaruh faktor-faktor lingkungan terhadap usia pakai kabel dan derating KHA menjadi sangat penting dalam pengoperasian sistem distribusi dan transmisi. Peningkatan resistansi pada kabel listrik seiring bertambahnya usia, dapat dijelaskan melalui beberapa faktor. Salah satunya adalah proses oksidasi, yang menyebabkan kerusakan isolasi pada kabel. Oksidasi ini mengakibatkan penurunan performa isolasi dan konduktor, sehingga meningkatkan resistansi dan menghasilkan kerugian panas yang lebih tinggi. Kondisi kelembaban yang masuk ke dalam kabel juga memperburuk situasi dengan memicu kerusakan lebih lanjut pada isolasi, yang pada akhirnya dapat mengganggu kemampuan kabel dalam menghantarkan arus secara efektif.

Beberapa studi menunjukkan bahwa peningkatan resistansi disebabkan oleh faktor-faktor seperti degradasi termal pada bahan isolasi, yang umumnya mempercepat kerusakan molekuler, mengurangi kekuatan dielektrik, dan menyebabkan penurunan konduktivitas. Misalnya, penelitian tentang kabel XLPE menunjukkan bahwa seiring bertambahnya usia kabel, terutama karena paparan panas, performa isolasi akan menurun, yang meningkatkan risiko kegagalan kabel (Choudhary et al., 2022) (Liu et al., 2022). Penelitian lebih lanjut juga mengungkapkan bahwa faktor seperti kelembaban mempercepat pembentukan *water trees*, yaitu struktur di dalam isolasi yang mengakibatkan peningkatan resistansi dan penurunan efektivitas konduksi (Choudhary et al., 2022). Degradasi material isolasi pada kabel listrik dapat menyebabkan isolasi menjadi rapuh atau retak seiring waktu, yang berpengaruh pada kemampuan kabel untuk mencegah arus bocor. Faktor-faktor seperti paparan panas, kelembaban, radiasi, dan tegangan listrik yang berlebihan berkontribusi pada proses degradasi ini. Penurunan kualitas isolasi ini menyebabkan peningkatan arus bocor, yang dapat mengurangi efisiensi penghantaran arus,

serta menurunkan rating arus kabel dan keselamatan pengoperasiannya (Choudhary et al., 2022) (Preduş et al., 2022).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa material isolasi, seperti polimer pada kabel XLPE, mengalami degradasi lebih cepat ketika terpapar kondisi operasi yang berat, terutama pada suhu tinggi atau lingkungan asam. Seiring waktu, insulasi kehilangan sifat dielektriknya, yang memicu kegagalan konduksi dan meningkatkan risiko kerusakan (Preduş et al., 2022). Untuk mencegah kerusakan ini, penting untuk memantau kondisi kabel secara berkala dan menjaga kabel dari lingkungan yang dapat mempercepat degradasi isolasi, seperti kelembaban tinggi atau paparan bahan kimia. Perubahan sifat termal pada kabel listrik seiring waktu, termasuk penurunan konduktivitas termal, mempengaruhi kemampuan kabel untuk mendistribusikan panas secara efektif. Salah satu faktor yang signifikan adalah bahan konduktor dan material isolasi yang dapat mengalami degradasi termal seiring waktu, yang pada akhirnya mengurangi kapasitas disipasi panas kabel dan menurunkan kemampuan arus yang dapat dibawa (*ampacity*). Misalnya, konduktor logam dalam kabel, seperti tembaga atau aluminium, memiliki konduktivitas termal tinggi, tetapi seiring waktu, perubahan suhu lingkungan dan material pendukung di sekitar kabel, seperti pasir atau campuran beton, dapat membatasi aliran panas, yang dapat mempengaruhi rating arus kabel (Verschaffel-Drefke et al., 2021) (Teja & Rajagopala, 2014). Selain itu, seiring peningkatan suhu kabel, resistansi konduktor juga meningkat, menyebabkan kerugian daya yang lebih besar dan peningkatan panas, yang lebih lanjut memperburuk kinerja termal kabel dan kapasitas arusnya (Radwan-Pragłowska et al., 2024).

Kerusakan mekanis pada kabel listrik, terutama akibat tekanan saat instalasi, tanah, atau kerusakan fisik lainnya, dapat mengurangi performa kabel dan mempengaruhi kemampuannya dalam

menghantarkan arus listrik. Faktor-faktor seperti lenturan yang berlebihan, tarikan berulang, gesekan, atau benturan fisik dapat merusak komponen dalam kabel, menyebabkan keausan dan menurunkan umur layanan kabel tersebut. Kerusakan ini sering mengakibatkan perubahan sifat mekanis seperti kelemahan pada insulasi atau konduktor, yang berpotensi menimbulkan kerugian daya dan risiko kebakaran (Su et al., 2022). Untuk mencegah kerusakan ini, sangat penting mematuhi spesifikasi produsen mengenai batas lentur kabel, menggunakan metode instalasi yang tepat, serta memastikan perlindungan mekanis yang memadai. Ini termasuk penggunaan pelindung atau lapisan tambahan pada kabel, khususnya di lingkungan dengan risiko gesekan atau tekanan tinggi.

Perubahan kimiawi pada kabel listrik dapat disebabkan oleh paparan lingkungan, seperti kontaminan, kondisi pH tanah yang ekstrem, atau senyawa kimia lainnya. Proses kimia ini dapat mempengaruhi sifat fisik dan mekanis material kabel, yang berpotensi menyebabkan degradasi isolasi dan penurunan kemampuan konduktor untuk menghantarkan arus secara aman. Misalnya, tanah dengan pH yang ekstrem atau korosif dapat meningkatkan risiko korosi dan degradasi kabel, sehingga menurunkan rating arusnya.

Peningkatan resistansi pada kabel listrik seiring bertambahnya usia merupakan hasil dari beberapa faktor seperti oksidasi, kelembaban, dan degradasi material isolasi. Proses oksidasi merusak isolasi dan meningkatkan resistansi, menghasilkan kerugian panas yang lebih tinggi. Kelembaban yang meresap memperburuk isolasi, menurunkan kemampuan kabel untuk menghantarkan arus secara efektif. Selain itu, degradasi material isolasi, terutama pada suhu tinggi atau lingkungan asam, mempercepat kerusakan konduktor, sehingga meningkatkan resistansi. Perubahan termal dan kerusakan mekanis juga memengaruhi kapasitas kabel dalam

mengelola panas dan menghantarkan arus secara aman. Lingkungan kimia yang ekstrem, seperti pH tanah, dapat mempercepat korosi, menurunkan rating arus, dan meningkatkan risiko kegagalan kabel. Pemantauan berkala dan perlindungan yang tepat sangat penting untuk menjaga performa kabel dari faktor-faktor ini. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi rating arus dari kabel listrik, antara lain:

1. **Peningkatan Tahanan:** Seiring bertambahnya usia, kabel listrik cenderung mengalami peningkatan tahanan (resistansi). Proses oksidasi, kelembaban, dan kerusakan pada isolasi menyebabkan peningkatan resistansi konduktor. Akibatnya, kerugian panas juga meningkat, yang akan menurunkan kemampuan kabel dalam menghantarkan arus secara efektif (MAHC DI, 2016) (Liu et al., 2022) (Choudhary et al., 2022).
2. **Degradasi Isolasi:** Material isolasi pada kabel listrik dapat mengalami degradasi seiring waktu. Degradasi ini menyebabkan material isolasi menjadi rapuh atau retak, sehingga kemampuannya dalam mencegah aliran arus bocor berkurang. Kondisi ini tentu saja dapat mempengaruhi rating arus dan keselamatan pengoperasian kabel. (Preduş et al., 2022) (Choudhary et al., 2022).
3. **Perubahan Sifat Termal:** Salah satu karakteristik penting kabel listrik adalah konduktivitas termal, yang memungkinkan panas hasil aliran arus untuk didisipasikan ke lingkungan. Seiring waktu, terjadi perubahan pada konduktivitas termal dan kapasitas disipasi panas kabel. Hal ini akan mempengaruhi kemampuan kabel dalam mengelola panas dan, pada akhirnya, mempengaruhi rating arus (Verschaffel-Drefke et al., 2021) (Teja & Rajagopala, 2014) (Radwan-Pragłowska et al., 2024)..

4. **Kerusakan Mekanis:** Kabel listrik yang terpapar oleh tekanan mekanis, baik karena proses instalasi, tekanan dari tanah, ataupun kerusakan fisik lainnya, dapat mengalami perubahan sifat mekanis. Kerusakan ini berpotensi menurunkan performa kabel dan mempengaruhi kemampuannya dalam menghantarkan arus listrik (Su et al., 2022)..
5. **Perubahan Kimiawi:** Faktor lingkungan seperti kontaminan, paparan kondisi pH tanah yang ekstrem, atau paparan senyawa kimia lainnya dapat menyebabkan perubahan kimia pada material kabel. Reaksi kimia ini dapat mempengaruhi karakteristik fisik dan mekanis dari kabel, sehingga menurunkan rating arus yang aman.
6. **Penuaan Material:** Proses penuaan alami konduktor dan material isolasi terjadi secara bertahap, dan dalam jangka waktu panjang, menyebabkan penurunan performa kabel. Penuaan material ini mengakibatkan menurunnya kemampuan kabel dalam menghantarkan arus, serta meningkatkan risiko kerusakan yang berakibat pada gangguan sistem distribusi tenaga listrik (Zou et al., 2024).

Kondisi-kondisi tersebut membuat pemeliharaan yang tepat terhadap kabel listrik menjadi penting untuk menjaga keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Pemeliharaan dan evaluasi kondisi kabel secara berkala diperlukan untuk memastikan bahwa rating arus yang diberikan pada kabel tetap valid dan tidak melebihi kapasitas operasionalnya. Jika kabel tetap dioperasikan melebihi rating arus yang aman, risiko terjadinya kegagalan atau kerusakan akan meningkat, yang dapat menyebabkan pemadaman listrik pada area yang luas.

Untuk memastikan keandalan sistem distribusi dan transmisi tenaga listrik,

diperlukan metode yang tepat untuk menentukan usia pakai kabel dan derating kHA. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memprediksi usia pakai kabel menggunakan pendekatan pemodelan matematis, yaitu hukum Arrhenius, dan menghitung derating kHA dengan mempertimbangkan faktor suhu lingkungan. Pemodelan ini diimplementasikan menggunakan perangkat lunak MATLAB, yang dapat membantu mempermudah analisis lebih lanjut dan memberikan hasil yang akurat dalam menentukan usia pakai dan derating kHA kabel.

Pemodelan matematis yang menggunakan pendekatan hukum Arrhenius yaitu salah satu aturan yang menggambarkan hubungan antara laju reaksi kimia dengan suhu. Hukum ini menggambarkan bahwa laju reaksi kimia meningkat secara eksponensial dengan kenaikan suhu. Melalui pemodelan ini, diharapkan tercipta pemahaman yang lebih mendalam mengenai bagaimana kondisi lingkungan, terutama suhu, mempengaruhi usia pakai kabel, sehingga memungkinkan optimasi perawatan dan pemilihan kabel yang lebih baik.

Selain itu, penentuan derating kHA berdasarkan kondisi lingkungan akan memastikan bahwa kabel tidak teroperasikan melebihi kapasitas maksimalnya, sehingga dapat mengurangi risiko kegagalan dan meningkatkan efisiensi distribusi tenaga listrik. Pendekatan ini penting untuk diimplementasikan dalam sistem distribusi modern agar dapat mengatasi tantangan yang dihadapi, terutama dalam hal meningkatnya permintaan listrik dan semakin kompleksnya infrastruktur distribusi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan analitis untuk mengevaluasi pengaruh usia kabel listrik terhadap perubahan rating arus penghantar. Beberapa parameter yang akan dikaji meliputi tahanan jenis kabel, luas penampang kabel, dan suhu operasi kabel. Simulasi perhitungan rating arus akan

dilakukan menggunakan perangkat lunak untuk berbagai skenario usia kabel.

Text artikel ditulis disini, text artikel ditulis disini, text artikel ditulis disini. Metode penelitian merupakan prosedur/tahapan dan teknik penelitian. Antara satu penelitian dengan penelitian yang lain, prosedur dan tekniknya akan berbeda.

1. Pemodelan Matematis Usia Pakai Kabel

- **Hukum Arrhenius untuk Usia Pakai Kabel**

Usia pakai kabel sangat dipengaruhi oleh laju degradasi material isolasi, yang dipengaruhi oleh suhu operasi. Hukum Arrhenius memberikan pendekatan untuk memodelkan hubungan antara laju degradasi dan suhu:

$$L(T) = L_0 \cdot e^{-Ea/(R \cdot T)}$$

di mana:

- $L(T)$: Usia pakai kabel pada suhu T (tahun)
- L_0 : Usia pakai kabel pada suhu referensi
- Ea : Energi aktivasi (J/mol)
- R : Konstanta gas (8.314 J/(mol·K))
- T : Suhu operasi kabel (K)

Persamaan di atas menunjukkan bahwa kenaikan suhu operasi mengakibatkan penurunan usia pakai kabel secara eksponensial.

- **Derating Kapasitas Hantar Arus**

Derating kHA dilakukan untuk menentukan arus maksimal yang aman untuk dialirkan melalui kabel berdasarkan kondisi lingkungan. Derating kHA dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$kHA_{derating} = kHA_{nominal} \cdot f(T)$$

di mana:

1. $kHA_{derating}$: Kapasitas hantar arus setelah derating (A)
2. $kHA_{nominal}$: Kapasitas hantar arus nominal pada kondisi standar (A)
3. $f(T)$: Faktor derating yang merupakan fungsi suhu lingkungan

Faktor derating ini bergantung pada suhu dan metode pemasangan kabel.

Tabel faktor derating umumnya disediakan oleh pabrikan kabel.

2. Studi Kasus dengan Simulasi MATLAB

Untuk mempermudah analisis, dilakukan pemodelan usia pakai kabel dan derating kHA menggunakan MATLAB. Kabel yang digunakan adalah kabel tembaga berisolasi PVC.

- **Parameter dan Kondisi Operasi**

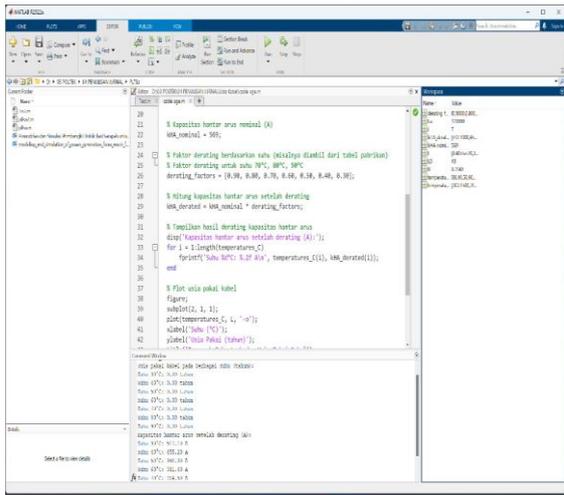
Parameter dan Kondisi Operasi yang digunakan pada simulasi ini, dapat dilihat pada tabel 1 berikut ini :

Tabel 1. Parameter dan kondisi Operasi

Parameter	Nilai
Jenis Kabel	Tembaga 300 mm ² dengan isolasi PVC[10]
KHA nominal (A)	569 A[10]
Suhu referensi (T)	90°C[10]
Energi aktivasi (Ea)	120 kJ/mol
Konstanta gas (R)	8.314 J/(mol·K)
Usia pakai pada suhu referensi (LO)	40 Tahun
Suhu operasi (T)	30°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C
Faktor Degradasi	0.3, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90

- **Kode MATLAB**

Berikut adalah kode MATLAB untuk memodelkan usia pakai dan derating kHA kabel:



Gambar 1. Kode Matlab

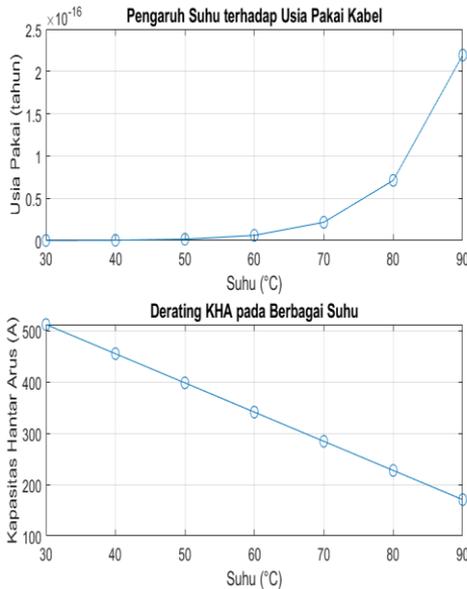
penurunan kHA dengan kenaikan suhu menunjukkan pentingnya perhitungan derating dalam perencanaan sistem distribusi untuk menghindari kegagalan akibat kelebihan beban.

Dari hasil pemodelan ini, dapat dilihat bahwa penting untuk memilih suhu operasi yang sesuai dan melakukan perhitungan derating kHA agar kabel tidak mengalami kondisi yang dapat mempercepat degradasi. Penggunaan MATLAB sebagai alat simulasi mempermudah proses analisis dan dapat digunakan oleh insinyur dalam perencanaan sistem distribusi listrik

HASIL DAN PEMBAHASAN

PENUTUP

Pemodelan matematis menggunakan hukum Arrhenius dapat digunakan untuk memperkirakan usia pakai kabel listrik, sementara derating kapasitas hantar arus perlu diperhitungkan untuk menjaga kabel tetap beroperasi pada arus yang aman. Dengan menggunakan MATLAB, proses simulasi menjadi lebih sederhana dan memberikan visualisasi yang jelas. Hasil simulasi ini diharapkan mampu memberikan panduan yang lebih baik untuk perencanaan dan pemeliharaan kabel listrik, sehingga keandalan sistem distribusi dapat terjaga.



Gambar 2. Hasil simulasi

Tabel 2. Pengaruh terhadap usia kabel

NO	TEMPERATUR (C)	DEGRADASI ARUS (A)
1.	30°C	512.10 A
2.	40°C	455.20 A
3.	50°C	398.30 A
4.	60°C	341.40 A
5.	70°C	284.50 A
6.	80°C	227.60 A
7.	90°C	170.70 A

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengaruh suhu terhadap usia pakai kabel sangat signifikan. Untuk setiap kenaikan suhu sebesar 10°C, terjadi penurunan usia pakai yang cukup besar. Selain itu,

REFERENSI

Choudhary, M., Shafiq, M., Kiitam, I., Hussain, A., Palu, I., & Taklaja, P. (2022). A Review of Aging Models for Electrical Insulation in Power Cables. *Energies*, 15(9). <https://doi.org/10.3390/en15093408>

lead-sheath-low-voltage-cable-2118.pdf. (n.d.).

Liu, Y., Wang, H., Zhang, H., & Du, B. (2022). Thermal Aging Evaluation of XLPE Power Cable by Using Multidimensional Characteristic Analysis of Leakage Current. *Polymers*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/polym14153147>

MAHC DI, A. R. (2016). Analisa Kelayakan Sistem Instalasi Listrik Melalui Pengujian Nilai Tahanan Isolasi Dan Tahanan

- Bumi. *Jurnal Teknik | Majalah Ilmiah Fakultas Teknik UNPAK*, 17(1), 1–9.
<https://doi.org/10.33751/teknik.v17i1.910>
- Preduş, M. F., Popescu, C., Răduca, E., & Haţiegan, C. (2022). Study of the Accelerated Degradation of the Insulation of Power Cables under the Action of the Acid Environment. *Energies*, 15(10).
<https://doi.org/10.3390/en15103550>
- Radwan-Pragłowska, N., Mamcarz, D., Albrechtowicz, P., & Rozegnał, B. (2024). The Current Harmonic Impact on Active Power Losses and Temperature Distribution in Power Cables. *Energies*, 17(16).
<https://doi.org/10.3390/en17164170>
- Su, J., Wei, L., Zheng, J., Liu, J., Zhang, P., Pang, X., & Xing, Y. (2022). Effects of Mechanical Stress on Insulation Structure and Performance of HV Cable. *Polymers*, 14(14).
<https://doi.org/10.3390/polym14142927>
- Teja, A. D., & Rajagopala, K. (2014). Thermal Analysis by Conduction Convection and Radiation in a Power Cable. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 9(3), 51–56.
<https://doi.org/10.9790/1676-09325156>
- Verschaffel-Drefke, C., Schedel, M., Balzer, C., Hinrichsen, V., & Sass, I. (2021). Heat dissipation in variable underground power cable beddings: Experiences from a real scale field experiment. *Energies*, 14(21).
<https://doi.org/10.3390/en14217189>
- Zou, Z., Liu, S., & Kang, J. (2024). *Degradation Mechanism and Online Electrical Monitoring Techniques of Stator Winding Insulation in Inverter-Fed Machines: A Review*.