

IMPLEMENTASI MACHINE LEARNING PADA SISTEM INFORMASI PEMELIHARAAN TRANSFORMATOR DAYA

Hilda Khoirotul Hidayah¹, Ekojono², Endah Septa Sintiya³

^{1,2,3}Teknologi Informasi, Politeknik Negeri Malang

¹hildakh07@gmail.com, ²ekojono@polinema.ac.id, ³e.septa@polinema.ac.id

Abstrak

Listrik memegang peranan yang tidak tergantikan dalam kehidupan manusia sehari-hari. Untuk memenuhi kebutuhan energi listrik yang semakin meningkat, diperlukan suatu sistem kelistrikan yang handal, seperti transformator daya. Transformator daya memegang peranan penting dalam sistem tenaga listrik, dimana keandalan transformator dalam jangka panjang sangat erat kaitannya dengan keselamatan dan kestabilan sistem tenaga listrik. Oleh karena itu, pemeliharaan transformator harus dilakukan untuk mengantisipasi kegagalan mendadak dan menjamin keandalan sistem tenaga listrik secara keseluruhan. Penting untuk melakukan penilaian kesehatan untuk mengetahui kondisi transformator daya. Penilaian ini dapat dilakukan dengan berbagai cara, termasuk *Health Index* (Indeks Kesehatan) dan *Dissolved Gas Analysis* (Analisis Gas Terlarut). Metode *Duval Pentagon* dan Metode *Duval Triangle* digunakan dalam *Dissolved Gas Analysis* untuk memastikan kondisi transformator. Tujuan dari penelitian ini adalah membandingkan tiga model *machine learning*—*Support Vector Machine*, *Artificial Neural Network*, dan *Random Forest*—menggunakan *dataset Duval Pentagon Method* dan *Duval Triangle Method* untuk mendapatkan model dengan akurasi tertinggi. Model dengan akurasi tertinggi akan diimplementasikan pada sistem informasi manajemen transformator untuk mengetahui kondisi transformator. Dalam sistem ini juga diterapkan perhitungan *Health Index* dengan minyak dan kertas sebagai parameter hasil pengujian. Hasil perhitungan *Health Index* dan *Dissolved Gas Analysis* dapat menentukan rekomendasi tindakan transformator yang tepat. Dengan demikian, sistem ini dapat memudahkan tenaga ahli transformator dalam menjaga kesehatan transformator daya.

Kata kunci : *Health Index, Dissolved Gas Analysis, Duval Pentagon, Duval Triangle, Support Vector Machine, Artificial Neural Network, Random Forest.*

1. Pendahuluan

Listrik merupakan salah satu kebutuhan pokok dalam kehidupan manusia. Sistem kelistrikan yang andal diperlukan untuk memenuhi kebutuhan daya listrik. Transformator daya mempunyai peranan penting dalam sistem tenaga listrik. Oleh karena itu, kesehatan transformator perlu dipantau untuk mencegah terjadinya gangguan mendadak yang dapat mempengaruhi distribusi listrik ke masyarakat. Tenaga ahli transformator melakukan perawatan rutin untuk mencegah kerusakan pada transformator. Pemeliharaan ini dilakukan melalui berbagai metode, antara lain penilaian Indeks Kesehatan dan Analisis Gas Terlarut.

Untuk penilaian Indeks Kesehatan dan Analisis Gas Terlarut, diperlukan data pengujian parameter Minyak dan Kertas, yang merupakan bagian dari sistem isolasi transformator. Penilaian transformator ini melibatkan banyak langkah untuk mengidentifikasi kesalahan, yang memerlukan banyak waktu dan upaya untuk menentukan tindakan yang tepat. Sementara itu, banyak transformator yang perlu dirawat oleh tenaga ahli. Oleh karena itu diperlukan suatu sistem yang dapat mempercepat

proses penilaian dan memberikan tindakan yang tepat berdasarkan identifikasi kesalahan.

Hasil pengujian pada sistem isolasi transformator akan digunakan untuk penilaian Indeks Kesehatan dan Analisis Gas Terlarut. Sistem melakukan penilaian tanpa memberikan informasi tentang cara menguji sistem isolasi transformator. Sistem berfungsi sebagai alat perhitungan, identifikasi gangguan, dan penyimpanan data laporan transformator. Dalam pengembangannya, sistem akan dirancang dan direncanakan terlebih dahulu untuk memudahkan tahap implementasi. Setiap kelengkapan fitur akan diuji agar apabila ada ketidaksesuaian dapat segera diperbaiki.

Penilaian Indeks Kesehatan dibagi menjadi dua jenis: Indeks Minyak dan Indeks Kertas. Hasil pengujian yang digunakan untuk penilaian Indeks Minyak adalah Tegangan Tembus (kV), Kadar Air (ppm), Kadar Asam (MgKOH/mg), Tegangan Antar Permukaan (Dyne/cm), dan Skala Warna. Untuk Indeks Kertas hasil pengujian meliputi CO (ppm), CO₂ (ppm), rasio CO₂/CO, 2FAL, Dpest, CH₄ (ppm), C₂H₆ (ppm), C₂H₄ (ppm), Tegangan Antar Permukaan (Dyne/cm), Kadar Air (ppm), Kadar Asam (MgKOH/mg), dan Skala Warna. Hasil

perhitungan indeks minyak dan kertas akan menentukan kondisi transformator dan tindakan yang disarankan.

Analisis Gas Terlarut (DGA) dilakukan dengan menggunakan berbagai metode, antara lain Metode *Duval Pentagon* (DPM) dan Metode *Duval Triangle* (DTM). Kedua metode tersebut memiliki beberapa langkah perhitungan yang memerlukan waktu yang cukup lama untuk mengidentifikasi kesalahan. Namun metode ini mempunyai akurasi yang tinggi dalam identifikasi kesalahan. Pada penelitian ini akan dilakukan perbandingan tiga model pembelajaran mesin yang dilatih dengan data pelatihan DTM dan DPM untuk mendapatkan model dengan akurasi tertinggi.

Beberapa penelitian terdahulu mendukung penelitian tersebut, antara lain “*High voltage power transformer condition assessment considering the health index value and its decreasing rate*”. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghitung Indeks Kesehatan berdasarkan Faktor Kegagalan, Faktor Kualitas Minyak, dan Faktor Kondisi Kertas dengan menggunakan penilaian dan pembobotan yang berbeda untuk setiap parameter. Penelitian ini menunjukkan bahwa perhitungan Indeks Kesehatan menunjukkan kesesuaian yang tinggi dengan kondisi transformator sebenarnya.

Pada penelitian berjudul “*Assessment of High Voltage Power Transformer Aging Condition Based on Health Index Value Considering Its Apparent and Actual Age*” bertujuan menerapkan metode Indeks Kesehatan pada 143 trafo untuk memperoleh nilai Indeks Kesehatan di berbagai populasi trafo. Setelah memperoleh nilai-nilai tersebut, dilakukan regresi linier untuk mencari fungsi linier yang dapat menggambarkan korelasi antara nilai indeks kesehatan dengan umur transformator. Pada penelitian ini, kondisi penuaan trafo ditentukan dengan mengamati umur semua trafo dengan memplot indeks kesehatan terhadap garis regresi. Umur yang terlihat pada transformator lebih mencerminkan kondisi penuaannya daripada usia sebenarnya. Transformator yang usianya terlihat lebih tua daripada usia sebenarnya dapat dikatakan mengalami penuaan yang lebih cepat. Metode yang diusulkan bertujuan untuk membantu tenaga ahli dalam mengambil tindakan yang tepat dalam menjaga keandalan transformator, kinerja, dan mencegah kegagalan transformator secara tiba-tiba.

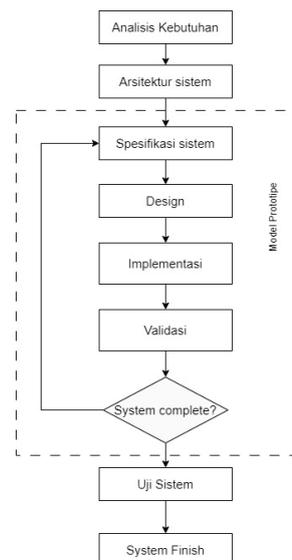
Dalam studi berjudul “*Study on Artificial Intelligence Approaches for Power Transformer Health Index Assessment*”. Tujuan dari penelitian ini adalah mengembangkan pendekatan berbasis AI untuk memperkaya metode konvensional (*Weight-sum*) dalam mengukur indeks kesehatan transformator daya. Beberapa algoritma AI dibandingkan untuk menemukan model dengan akurasi tertinggi dalam memprediksi Indeks Kesehatan Transformator. Metode yang dibandingkan mencakup *Artificial Neural Network (ANN)*, *Adaptive Neuro-Fuzzy*

Inference System (ANFIS), *Markov Chain*, *Support Vector Machine (SVM)*, *General Regression Neural Network (GRNN)*, *Principal Component Analysis (PCA)*, *Random Forest*, dan *Analytical Hierarchy Process (AHP)*. Dalam penelitian ini, akurasi klasifikasi tertinggi dicapai dengan metode *Random Forest*, yaitu 97,3% untuk *AI Full* (berdasarkan AI pada seluruh tahapan klasifikasi) dan 98% untuk *AI-SW* (berdasarkan AI pada kategori faktor dan *Scoring-Weighting* berdasarkan kategori HI). Algoritma lainnya, berdasarkan urutan akurasi, adalah *decision tree* (96%), *AdaBoost* (94.8%), *neural network* (91.3%), *SVM* (89.3%), *Naïve Bayes* (70.7%), dan *kNN* (70%).

Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan model pembelajaran mesin, seperti *Support Vector Machine (SVM)*, *Artificial Neural Network (ANN)*, dan *Random Forest*. Model ini dipilih karena pada penelitian sebelumnya mengenai penerapan model pembelajaran mesin dalam penilaian Indeks Kesehatan menunjukkan bahwa ketiga model ini memiliki akurasi yang tinggi. Model dengan akurasi tertinggi akan diimplementasikan pada sistem informasi pemeliharaan transformator untuk memudahkan identifikasi gangguan. Jenis kesalahan ini akan dikategorikan berdasarkan tingkat keparahan kondisinya. Berdasarkan kategori tersebut, prioritas pemeliharaan transformator dapat ditentukan.

2. Metode

Pengembangan sistem untuk memantau kesehatan transformator menggunakan Indeks Kesehatan dan Analisis Gas Terlarut mengikuti alur model prototipe Siklus Hidup Pengembangan Perangkat Lunak (SDLC).



Gambar 1. Model Prototipe

Model prototipe adalah metode yang memungkinkan pengguna untuk memiliki gambaran awal tentang perangkat lunak yang akan

dikembangkan, dan pengguna dapat melakukan pengujian sejak dini sebelum perangkat lunak tersebut dirilis. Tahapan metode yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 1. Proses pengembangan dengan menggunakan model prototipe melibatkan beberapa tahapan yang terstruktur dan berulang.

2.1 Analisis Kebutuhan

Pada tahap ini, pengumpulan data dan informasi dilakukan sebagai dasar untuk pengembangan sistem. Tahap analisis kebutuhan dibagi menjadi dua bagian: kebutuhan fungsional dan kebutuhan non-fungsional.

Tabel 1. Kebutuhan Fungsional

No	Pengguna	Keterangan
1	Staf manajemen	Dapat memasukkan data parameter yang mempengaruhi kondisi transformator saat melakukan pemeliharaan serta melihat hasil perhitungan Health Index dan Dissolved Gas Analysis (DGA).
2	Verifikator	Dapat memverifikasi data laporan Health Index dan Dissolved Gas Analysis (DGA) yang telah dimasukkan.
3	Manajer Aset	Dapat memasukkan data transformator yang berisikan deskripsi dari setiap jenis transformator serta melihat hasil rekomendasi tindakan yang diperlukan pada transformator.
4	Supervisor	Dapat melakukan kustomisasi rumus perhitungan sesuai dengan kebutuhan, dapat melihat hasil rekomendasi tindakan yang diperlukan pada transformator serta mengunduh laporan.
5	Admin	Dapat memasukkan data parameter dan data transformator, memverifikasi data tersimpan, kustomisasi rumus, melihat hasil perhitungan dan rekomendasi serta mengunduh laporan.

Kebutuhan fungsional mencakup berbagai proses yang akan dijalankan oleh sistem, seperti respons sistem terhadap situasi tertentu. Kebutuhan fungsional dapat dilihat pada Tabel 1.

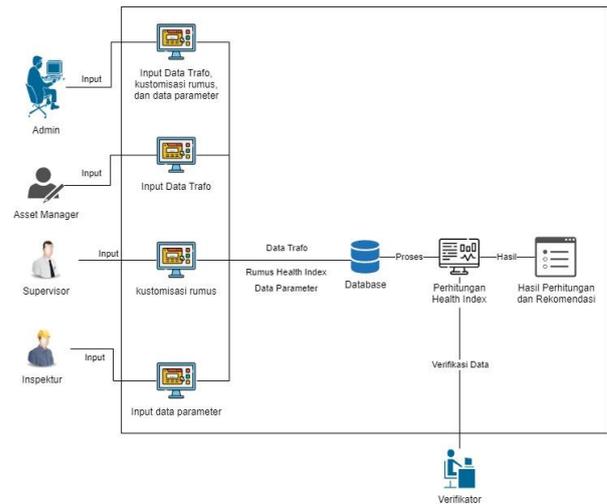
Tabel 2. Kebutuhan Non Fungsional

No	Parameter	Keterangan
1	Usability	Sistem memiliki rancangan yang mudah dipahami oleh pengguna.
2	Compatibility	Semua fitur dalam sistem dapat digunakan pada semua jenis browser.
3	Security	Sistem hanya bisa diakses oleh pengguna yang terdaftar di sistem. Setiap pengguna akan memiliki otorisasi sesuai dengan rolenya.

Sementara itu, kebutuhan non-fungsional meliputi keterbatasan kemampuan sistem dan menggambarkan kebutuhan tidak langsung yang terkait dengan fitur sistem. Kebutuhan non-fungsional dapat dilihat pada Tabel 2.

2.2 Arsitektur Sistem

Setelah analisis kebutuhan, tahap berikutnya adalah arsitektur sistem, yaitu desain atau pengaturan dari suatu sistem yang dapat mencakup jaringan, perangkat keras, dan perangkat lunak yang terstruktur. Arsitektur sistem manajemen aset transformator dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Arsitektur Sistem

Sistem ini dirancang untuk lima jenis pengguna, yaitu admin, staf manajemen, verifikator, manajer aset, dan *supervisor*. Admin dapat memasukkan data transformator, data parameter, dan menyesuaikan rumus. Manajer aset memasukkan data transformator yang berisi deskripsi jenis transformator. *Supervisor* menyesuaikan rumus indeks kesehatan sesuai dengan kebutuhan perhitungan. Staf manajemen memasukkan data parameter berdasarkan pengujian yang dilakukan pada transformator. Data yang dimasukkan akan disimpan dalam *database* untuk diproses lebih lanjut oleh sistem. Pemrosesan dilakukan menggunakan metode indeks kesehatan yang terintegrasi dengan rumus dan pembelajaran mesin. Hasil perhitungan dari proses ini akan digunakan untuk menentukan prioritas pemeliharaan transformator. Hasil pemrosesan secara keseluruhan akan ditampilkan oleh sistem dalam bentuk laporan.

2.3 Spesifikasi Sistem

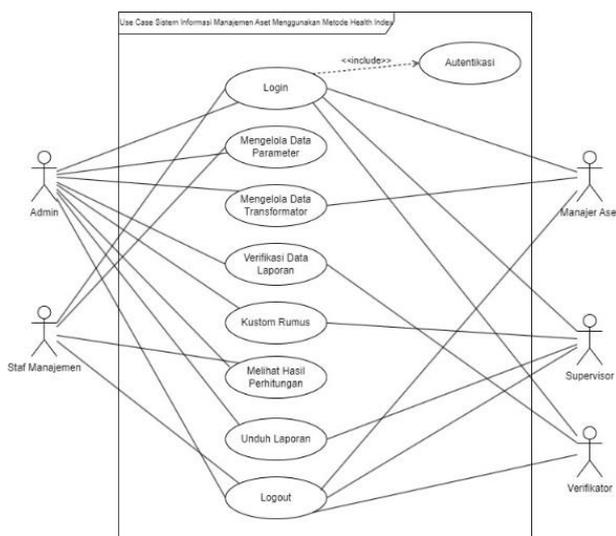
Setelah arsitektur sistem selesai, tahap berikutnya adalah spesifikasi sistem. Spesifikasi sistem menjelaskan setiap aspek dari bagian-bagian sistem yang akan dibangun dan merinci fungsi serta fitur yang dibutuhkan oleh sistem yang sedang dikembangkan. Spesifikasi sistem, yang disesuaikan dengan kebutuhan pengguna dalam sistem manajemen aset ini, adalah sebagai berikut:

- Sistem memiliki fitur otentikasi dan otorisasi untuk memastikan bahwa hanya pengguna yang berwenang yang dapat mengakses sistem.
- Sistem dapat menyimpan data transformator, termasuk deskripsi seperti spesifikasi, merek, kode, nomor seri, dan sebagainya.
- Sistem dapat menyimpan data parameter yang dimasukkan oleh pengguna. Data parameter dapat ditambahkan sebagai nilai input baru ke dalam dataset pembelajaran mesin.
- Sistem menyediakan fitur untuk menyesuaikan rumus indeks kesehatan yang digunakan dalam perhitungan.

- e. Sistem dapat memberikan opsi untuk menggunakan metode DPM atau DTM dalam menentukan kondisi kerusakan.
- f. Sistem dapat menentukan kondisi kesehatan transformator menggunakan metode indeks kesehatan yang terintegrasi dengan rumus yang disesuaikan.
- g. Sistem dapat memvisualisasikan ringkasan data yang disimpan, dan pengguna dapat mengunduhnya dalam bentuk laporan.
- h. Sistem dapat mengirim notifikasi kepada pengguna ketika ada proses dalam sistem yang memerlukan tindakan tertentu.

2.4 Desain

Tahap berikutnya adalah merancang sistem yang ditentukan. Dalam tahap perancangan ini, persyaratan fungsional dirancang menggunakan metode *Unified Modeling Language (UML)*, yang mencakup diagram kasus penggunaan. Diagram sistem kasus penggunaan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Use Case

Sistem ini memiliki lima aktor utama: admin, inspektur, verifikator, asset manager, dan supervisor, yang masing-masing memiliki peran spesifik. Admin memiliki akses penuh untuk mengelola data, memverifikasi, kustomisasi rumus, serta mengunduh laporan. Sementara itu, asset manager mengelola data transformator, staff maintenance mengelola data parameter, verifikator memeriksa hasil perhitungan, dan supervisor mengatur rumus perhitungan serta dapat mengunduh laporan.

2.5 Implementasi

Pada tahap implementasi, sebuah sistem penilaian kondisi transformator akan dibangun dengan menerapkan model pembelajaran mesin, berdasarkan hasil desain dari tahap sebelumnya. Sistem ini akan berbasis *website*. Kemudian model pembelajaran mesin dengan akurasi tertinggi akan

dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman *Python*.

2.6 Validasi

Tahap Validasi bertujuan untuk memastikan bahwa prototipe secara konsisten memenuhi persyaratan yang telah ditetapkan, sesuai dengan spesifikasi sistem dan analisis kebutuhan yang dijelaskan sebelumnya. Tahap ini juga mencakup evaluasi konsistensi implementasi dengan sistem yang dirancang. Ini melibatkan tinjauan untuk memastikan bahwa setiap elemen sistem yang diimplementasikan sesuai dengan rencana yang ditetapkan selama tahap desain.

2.7 Sistem Selesai

Pada tahap ini, dilakukan pemeriksaan untuk memastikan apakah seluruh sistem sudah lengkap atau masih memerlukan perbaikan. Verifikasi ini melibatkan perbandingan dengan persyaratan yang dinyatakan dalam tahap analisis kebutuhan sistem. Jika sistem memenuhi persyaratan dengan baik, proses akan dilanjutkan ke tahap pengujian sistem. Namun, jika terdapat ketidaksesuaian dalam hal fitur atau fungsi, revisi akan dilakukan, dimulai dari tahap spesifikasi sistem. Proses ini diulang hingga sistem dianggap memenuhi persyaratan yang ditetapkan dalam tahap analisis kebutuhan. Pada tahap ini, mungkin akan ada beberapa iterasi hingga sistem dinyatakan lengkap sesuai dengan standar yang ditetapkan.

2.8 Pengujian

Pengujian sistem mencakup pemeriksaan menyeluruh terhadap seluruh sistem untuk mengidentifikasi dan memperbaiki masalah yang masih ada. Pengujian ini memastikan bahwa seluruh prototipe berfungsi dengan baik dan memenuhi kriteria yang telah ditetapkan.

2.9 System Finish

Tahap akhir dari metode prototipe SDLC adalah penyelesaian sistem. Sistem yang telah dibangun dan melewati tahap pengujian sistem kini dapat digunakan. Pada tahap ini, sistem telah dipastikan berfungsi dengan lancar.

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Pengujian Metode

Dataset ini berisi parameter dari *Duval Triangle Method (DTM)*, *Duval Pentagon Method (DPM)*, dan Jenis Gangguan Transformator. Sebelum pemodelan, data yang hilang ditangani, dan *dataset* dibagi menjadi set pelatihan dan pengujian. Tiga model pembelajaran mesin— *Artificial Neural Network (ANN)*, *Support Vector Machine (SVM)*, dan *Random Forest*—dibandingkan. *Hyperparameter* untuk setiap model dioptimalkan menggunakan *Grid*

Search dan Random Search. Akhirnya, model-model dilatih dengan *hyperparameter* terbaik. Hasil pengujian untuk model pembelajaran mesin dapat dilihat di Tabel 6, 7, dan 8.

Dengan menggunakan *hyperparameter default*, model menunjukkan akurasi yang stabil tetapi lebih rendah dibandingkan dengan hasil *tuning* melalui *Grid Search* dan *Random Search*. Hasil *Hyperparameter* terbaik pada setiap model dapat dilihat pada Tabel 3, 4, 5.

Akurasi model dibandingkan menggunakan *confusion matrix* untuk menentukan model dengan kinerja tertinggi. *Confusion matrix* diterapkan pada setiap metode DTM dan DPM dengan *tuning hyperparameter*. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa *Random Forest* mencapai akurasi tertinggi pada *dataset* DTM, sementara SVM unggul pada *dataset* DPM.

Tabel 3. *Hyperparameter* Terbaik pada *Artificial Neural Network (ANN)*

<i>Hyperparameter Tuning</i>	<i>Hyperparameter</i>	<i>Dataset</i>				
		DTM 1	DTM 4	DTM 5	DPM 1	DPM 2
<i>No Tuning (Default)</i>	<i>Activation</i>	Relu	Relu	Relu	Relu	Relu
	<i>Alpha</i>	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
	<i>hidden_layer_sizes</i>	(100,)	(100,)	(100,)	(100,)	(100,)
<i>Random Search</i>	<i>solver</i>	Adam	Adam	Adam	Adam	Adam
	<i>Activation</i>	Relu	Relu	Relu	Relu	Relu
	<i>Alpha</i>	0.001	0.0001	0.001	0.001	0.0001
<i>Grid Search</i>	<i>hidden_layer_sizes</i>	(100,50)	(100,50)	(100,50)	(100,50)	(100,50)
	<i>solver</i>	Adam	Adam	Adam	Adam	Adam
	<i>Activation</i>	Relu	Relu	Relu	Relu	Relu
<i>Grid Search</i>	<i>Alpha</i>	0.001	0.0001	0.01	0.01	0.0001
	<i>hidden_layer_sizes</i>	(100,50)	(100,50)	(100,50)	(100,50)	(100,50)
	<i>solver</i>	Adam	Adam	Adam	Adam	Adam

Tabel 4. *Hyperparameter* Terbaik pada *Random Forest*

<i>Hyperparameter Tuning</i>	<i>Hyperparameter</i>	<i>Dataset</i>				
		DTM 1	DTM 4	DTM 5	DPM 1	DPM 2
<i>No Tuning (Default)</i>	<i>bootstrap</i>	True	True	True	True	True
	<i>max_depth</i>	None	None	None	None	None
	<i>min_samples_leaf</i>	1	1	1	1	1
	<i>min_samples_split</i>	2	2	2	2	2
	<i>n_estimators</i>	100	100	100	100	100
<i>Random Search</i>	<i>bootstrap</i>	True	False	False	False	False
	<i>max_depth</i>	None	30	None	10	10
	<i>min_samples_leaf</i>	2	2	1	1	1
	<i>min_samples_split</i>	10	10	5	5	5
	<i>n_estimators</i>	100	100	100	200	100
<i>Grid Search</i>	<i>bootstrap</i>	True	False	False	False	False
	<i>max_depth</i>	None	30	None	10	10
	<i>min_samples_leaf</i>	2	2	1	1	1
	<i>min_samples_split</i>	10	10	5	5	5
	<i>n_estimators</i>	100	50	50	200	100

Tabel 5. *Hyperparameter* Terbaik pada *Support Vector Machine (SVM)*

<i>Hyperparameter Tuning</i>	<i>Hyperparameter</i>	<i>Dataset</i>				
		DTM 1	DTM 4	DTM 5	DPM 1	DPM 2
<i>No Tuning (Default)</i>	<i>C</i>	-	-	-	-	-
	<i>gamma</i>	-	-	-	-	-
	<i>kernel</i>	-	-	-	-	-
<i>Random Search</i>	<i>C</i>	10	100	10	10	10
	<i>gamma</i>	1	1	1	1	1
	<i>kernel</i>	rbf	poly	rbf	rbf	rbf
<i>Grid Search</i>	<i>C</i>	10	100	100	100	100
	<i>gamma</i>	10	1	1	1	10
	<i>kernel</i>	rbf	poly	rbf	rbf	rbf

Tabel 6. Hasil *Confusion Matrix* untuk *Artificial Neural Network*

No	<i>Dataset</i>	<i>Hyperparameter Tuning</i>	<i>Precision</i>	<i>Recall</i>	<i>F1-score</i>	<i>Accuracy</i>
1	DTM 1	<i>No Tuning</i>	0.96	0.95	0.95	0.95
		<i>Random Search</i>	0.98	0.98	0.98	0.98
		<i>Grid Search</i>	0.98	0.98	0.98	0.98
2	DTM 4	<i>No Tuning</i>	0.93	0.92	0.92	0.92
		<i>Random Search</i>	0.94	0.93	0.93	0.93
		<i>Grid Search</i>	0.94	0.93	0.93	0.93
3	DTM 5	<i>No Tuning</i>	0.96	0.96	0.96	0.96
		<i>Random Search</i>	0.99	0.98	0.98	0.98
		<i>Grid Search</i>	0.99	0.98	0.98	0.98

4	DPM 1	<i>No Tuning</i>	0.92	0.91	0.91	0.91
		<i>Random Search</i>	0.96	0.95	0.95	0.95
		<i>Grid Search</i>	0.95	0.94	0.94	0.94
5	DPM 2	<i>No Tuning</i>	0.95	0.95	0.95	0.95
		<i>Random Search</i>	0.97	0.97	0.97	0.97
		<i>Grid Search</i>	0.97	0.97	0.97	0.97

Tabel 7. Hasil Confusion Matrix untuk Random Forest

No	Dataset	Hyperparameter Tuning	Precision	Recall	F1-score	Accuracy
1	DTM 1	<i>No Tuning</i>	0.99	0.99	0.99	0.99
		<i>Random Search</i>	0.99	0.99	0.99	0.99
		<i>Grid Search</i>	0.99	0.99	0.99	0.99
2	DTM 4	<i>No Tuning</i>	0.99	0.99	0.99	0.99
		<i>Random Search</i>	1.00	1.00	1.00	1.00
		<i>Grid Search</i>	1.00	1.00	1.00	1.00
3	DTM 5	<i>No Tuning</i>	0.99	0.99	0.99	0.99
		<i>Random Search</i>	0.99	0.99	0.99	0.99
		<i>Grid Search</i>	0.99	0.99	0.99	0.99
4	DPM 1	<i>No Tuning</i>	0.94	0.94	0.94	0.94
		<i>Random Search</i>	0.93	0.93	0.93	0.93
		<i>Grid Search</i>	0.93	0.93	0.93	0.93
5	DPM 2	<i>No Tuning</i>	0.96	0.96	0.96	0.96
		<i>Random Search</i>	0.97	0.97	0.97	0.97
		<i>Grid Search</i>	0.97	0.97	0.97	0.97

Tabel 8. Hasil Confusion Matrix untuk Support Vector Machine

No	Dataset	Hyperparameter Tuning	Precision	Recall	F1-score	Accuracy
1	DTM 1	<i>No Tuning</i>	0.96	0.96	0.96	0.96
		<i>Random Search</i>	0.99	0.99	0.99	0.99
		<i>Grid Search</i>	0.99	0.99	0.99	0.99
2	DTM 4	<i>No Tuning</i>	0.93	0.94	0.93	0.94
		<i>Random Search</i>	0.96	0.96	0.96	0.96
		<i>Grid Search</i>	0.96	0.96	0.96	0.96
3	DTM 5	<i>No Tuning</i>	0.94	0.93	0.93	0.93
		<i>Random Search</i>	0.98	0.97	0.98	0.97
		<i>Grid Search</i>	0.99	0.99	0.99	0.99
4	DPM 1	<i>No Tuning</i>	0.94	0.92	0.92	0.92
		<i>Random Search</i>	0.95	0.94	0.94	0.94
		<i>Grid Search</i>	0.97	0.96	0.96	0.96
5	DPM 2	<i>No Tuning</i>	0.93	0.92	0.92	0.92
		<i>Random Search</i>	0.95	0.95	0.95	0.95
		<i>Grid Search</i>	0.98	0.98	0.98	0.98

3.2 Hasil Uji Fungsional

Pengujian sistem menggunakan pengujian blackbox adalah metode untuk menemukan fungsi atau fitur yang mungkin tidak berfungsi dengan benar dan untuk menguji apakah sistem beroperasi sesuai dengan fitur yang dirancang.

Tabel 9. Pengujian Fungsional sebelum Pengguna Login ke Sistem

No	Halaman	Skenario Pengujian	Hasil yang diharapkan	Hasil
1	<i>Login</i>	<i>User</i> melakukan login dengan <i>input email</i> dan <i>password</i> yang benar terdaftar pada sistem	<i>User</i> dapat masuk ke sistem	Sesuai
		<i>User</i> melakukan login dengan <i>input email</i> dan <i>password</i> yang tidak terdaftar pada sistem	<i>User</i> tidak dapat masuk ke sistem dan tetap berada di halaman <i>login</i>	Sesuai
2	Halaman registrasi	<i>User</i> memasukkan nama, <i>email</i> , sandi dan konfirmasi sandi serta klik <i>checkbox</i> tanda setuju pada <i>term</i> dan <i>conditions</i> untuk melakukan registrasi	<i>User</i> berhasil registrasi dan diarahkan ke halaman <i>dashboard</i>	Sesuai

<i>User</i> memasukkan nama, <i>email</i> , sandi dan konfirmasi sandi tanpa klik <i>checkbox</i> setuju pada <i>term</i> dan kondisi	Registrasi gagal dan sistem Menampilkan pesan kesalahan	Sesuai
---	---	--------

Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem sesuai dengan desain yang telah ditetapkan sebelumnya. Salah satu kasus uji, yang dijelaskan dalam Tabel 9, memeriksa fungsionalitas sebelum pengguna memasuki sistem.

3.3 Hasil Uji Sistem

Sistem pemeliharaan transformator daya, menggunakan metode *Health Index* dan DGA, diuji menggunakan *User Acceptance Testing* (UAT) dengan tujuh peserta dari program Diploma-IV Sistem Kelistrikan. Hasilnya menunjukkan bahwa sistem berhasil memenuhi fungsi yang diinginkan, dengan pengguna merasa antarmukanya mudah dipahami, fiturnya mudah dioperasikan, dan informasinya jelas. Sebagian besar peserta setuju bahwa sistem ini efektif dalam menentukan indeks kesehatan dan mengidentifikasi gangguan pada transformator, meskipun ada beberapa *bug* kecil yang

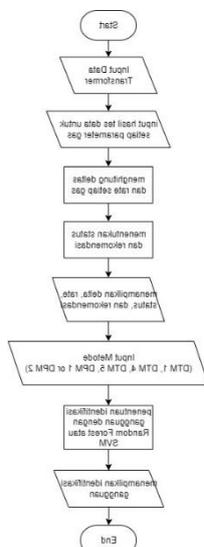
ditemukan. Pengguna juga memberikan saran untuk pengembangan lebih lanjut guna meningkatkan sistem dan memperluas aplikasinya ke area lain seperti distribusi daya listrik. Secara keseluruhan, sistem ini menerima skor kepuasan yang tinggi sebesar 92,85%, yang mencerminkan kegunaan dan fungsionalitasnya yang kuat.

3.4 Pembahasan

Berdasarkan pengujian data penelitian yang dilakukan oleh penguji, hasil diskusi menunjukkan bahwa sistem informasi prioritas pemeliharaan transformator daya, menggunakan metode *Health Index* dan *Dissolved Gas Analysis (DGA)*, telah diterima dengan baik oleh pengguna. Antarmuka aplikasi memenuhi kebutuhan pengguna dan mudah dipahami, dengan semua fitur yang ramah pengguna dan berfungsi sebagaimana mestinya. Pengguna menemukan bahwa informasi yang disediakan oleh sistem jelas dan membantu, terutama dalam menerapkan metode *Health Index* dan *DGA* untuk menentukan kondisi transformator dan merekomendasikan tindakan pemeliharaan yang sesuai. Fitur formula kustom juga terbukti bermanfaat bagi pengguna, memungkinkan mereka menghitung *Health Index* sesuai dengan kebutuhan penelitian tertentu. Selain itu, penggunaan *Machine Learning* dalam mengidentifikasi gangguan transformator melalui *DGA* telah memberikan manfaat bagi pengguna. Masukan dari pengguna menyarankan pengembangan lebih lanjut aplikasi ini, termasuk penambahan lebih banyak metode untuk analisis yang lebih komprehensif atau pembuatan sistem serupa dengan tujuan yang berbeda.

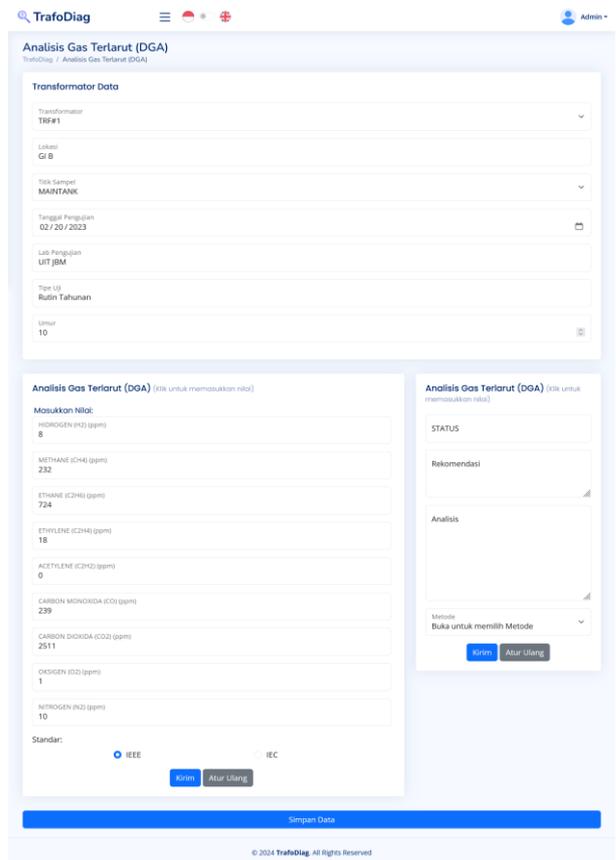
3.5 Implementasi Sistem

Model *Random Forest* dan *SVM* diimplementasikan pada halaman perhitungan *Dissolved Gas Analysis (DGA)* di bawah bagian penentuan Jenis Gangguan Transformator.



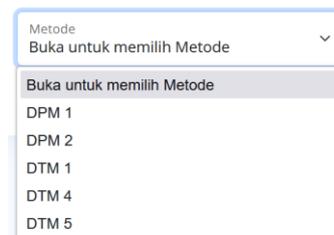
Gambar 4. Flowchart untuk Identifikasi Gangguan

Pengguna harus memasukkan data transformator dan hasil uji parameter gas, dari mana sistem menghitung *delta* dan rasio untuk menentukan status transformator dan memberikan rekomendasi. Pengguna dapat memilih dari metode DTM 1, DTM 4, DTM 5, DPM 1, atau DPM 2. Setelah memilih metode, sistem akan menampilkan Jenis Gangguan Transformator. Gambar 4 menunjukkan diagram alur untuk menentukan Jenis Gangguan Transformator menggunakan model *Random Forest* dan *SVM*.



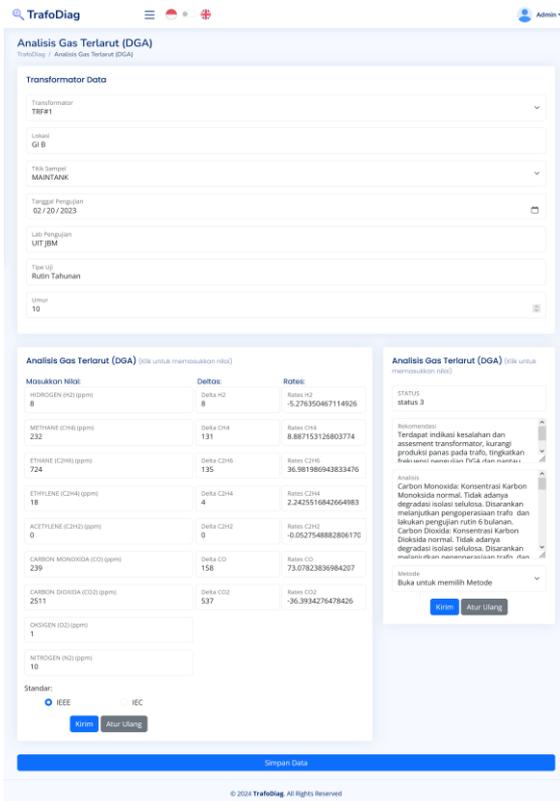
Gambar 5. Input Data Transformator dan Hasil Pengujian

Model *Random Forest* dan *SVM* diimplementasikan pada halaman *Dissolved Gas Analysis*. Pengguna harus memasukkan data transformator dan hasil uji parameter gas untuk menentukan jenis gangguan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



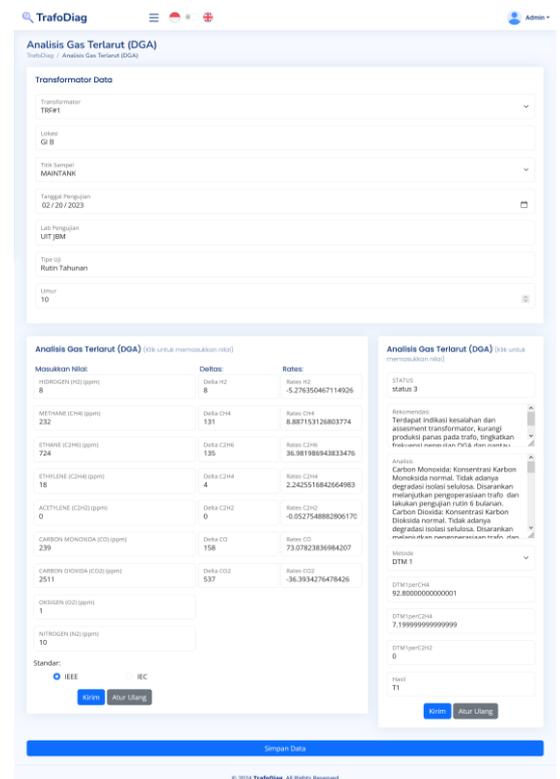
Gambar 6. Pemilihan Metode Identifikasi Gangguan

Perhitungan *delta* dan rasio, bersama dengan status transformator dan tindakan yang direkomendasikan, ditampilkan dalam Gambar 7.



Gambar 7. Hasil Perhitungan

Gambar 6 menunjukkan implementasi model *Random Forest* dan *SVM* dalam memilih metode penentuan jenis gangguan.



Gambar 6. Hasil Identifikasi Gangguan

Hasil jenis gangguan yang diperoleh dari beberapa masukkan nilai sebelumnya ditampilkan seperti pada Gambar 8.

4 Kesimpulan

Penelitian tentang penerapan pembelajaran mesin dalam sistem prioritas pemeliharaan transformator daya menyimpulkan bahwa sistem ini secara efektif mendukung pemeliharaan dengan memberikan rekomendasi tindakan berdasarkan kondisi transformator, menggunakan perhitungan dari *Health Index* dan *Dissolved Gas Analysis (DGA)*. Studi ini membandingkan *Artificial Neural Network (ANN)*, *Random Forest*, dan *Support Vector Machine (SVM)* untuk mengklasifikasikan jenis gangguan transformator menggunakan data dari DTM 1, DTM 4, DTM 5, DPM 1, dan DPM 2. *Random Forest* menunjukkan akurasi tertinggi untuk dataset DTM, sementara *SVM* unggul dalam dataset DPM. Sistem ini berhasil mengintegrasikan model-model tersebut, memungkinkan pengguna untuk memilih metode DGA untuk penentuan jenis gangguan, sehingga menawarkan fleksibilitas untuk memenuhi berbagai kebutuhan perhitungan.

Daftar Pustaka:

Abdullah, A. M., Ali, R., Yaacob, S. B., Mansur, T., & Baharudin, N. H. (2021). Prediction of Transformer Health Index Using Condition Situation Monitoring (CSM) Diagnostic Techniques. *Journal of Physics: Conference Series*, 1878(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1878/1/012007>

Alqudsi, A., & El-Hag, A. (2019). Application of machine learning in transformer health index prediction. *Energies*, 12(14). <https://doi.org/10.3390/en12142694>

Amalia, D., Murdiya, F., & Elektro, J. T. (2017). Analisa Gas Terlarut Pada Minyak Transformator Daya 150 kV Dengan Menggunakan Metode Duval Pentagon. In *Jom FTEKNIK* (Vol. 4, Issue 1).

Bustamante, S., Manana, M., Arroyo, A., Castro, P., Laso, A., & Martinez, R. (2019). Dissolved gas analysis equipment for online monitoring of transformer oil: A review. In *Sensors (Switzerland)* (Vol. 19, Issue 19). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/s19194057>

C57.104-2019 - *IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers*. (2019). IEEE.

Condition assessment of power transformers. (2019). *Foundations_of_Machine_Learning_second_e*. (n.d.).

Furqaranda, R., Bintoro, A., Asri, A., Al-Ani, W. K. A., & Shrestha, A. (2022). Analysis Oil Condition of Transformer PT-8801-A by Using the Method TDCG, Rogers Ratio, Key Gas, and Duval Triangle: A Case Study at PT. Perta Arun

- Gas. *Journal of Renewable Energy, Electrical, and Computer Engineering*, 2(2), 47. <https://doi.org/10.29103/jreece.v2i2.8567>
- Gouda, O. E., El-Hoshy, S. H., & Tamaly, H. H. E. L. (2019). Condition assessment of power transformers based on dissolved gas analysis. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 13(12), 2299–2310. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.6168>
- Guo, H., & Guo, L. (2022). Health index for power transformer condition assessment based on operation history and test data. *Energy Reports*, 8, 9038–9045. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.07.041>
- International Electrotechnical Commission., & International Electrotechnical Commission. Technical Committee 10. (2013). *Mineral insulating oils in electrical equipment--supervision and maintenance guidance = Huiles minérales isolantes dans les matériels électriques--lignes directrices pour la maintenance et la surveillance*. International Electrotechnical Commission.
- Introduction_to_Machine_Learning_fourth*. (n.d.).
- Isaac Abiodun, O., Jantan, A., Esther Omolara, A., Victoria Dada, K., AbdElatif Mohamed, N., & Arshad, H. (2018). State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey. *Heliyon*, 4, e00938. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018>
- Khatib Sulaiman, J., Agung Nurcahyo, J., Bayu Sasongko, T., Amikom Yogyakarta, U., & Kunci, K. (n.d.). Hyperparameter Tuning Algoritma Supervised Learning untuk Klasifikasi Keluarga Penerima Bantuan Pangan Beras. *Indonesian Journal of Computer Science*.
- Martínez Gomez, M. (2023). Transformers. In J. García (Ed.), *Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering* (pp. 247–255). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821204-2.00126-4>
- Prasojo, R. A., & Suwarno. (2018). Power transformer paper insulation assessment based on oil measurement data using SVM-classifier. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 10(4), 661–673. <https://doi.org/10.15676/ijeei.2018.10.4.4>
- Rahman Hidayat, A., Jamal, A., Nur Nazilah Chamim, A., Syahputra, R., Zainal Abidin Pagar Alam, J., Ratu, L., & Lampung, B. (2019). Analysis of Power Transformer Insulation: A Case Study in 150 kV Bantul Substation. *Journal of Electrical Technology UMY (JET-UMY)*, 3(2).
- Rahman Khalil, B., & Mahmood Fage Hussein, M. (2023). *HEART FAILURE PATIENTS ARE CLASSIFIED USING THE RANDOM FOREST AND NAÏVE BAYES ALGORITHMS*. <https://dbdxxb.cn/>
- Rediansyah, D., Prasojo, R. A., & Suwarno. (2021). Study on Artificial Intelligence Approaches for Power Transformer Health Index Assessment. *Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Informatics*. <https://doi.org/10.1109/ICEEI52609.2021.9611109>
- Safety of machinery - electrical equipment of machinesnPart 1, General requirements*. (n.d.).
- Tamma, W. R., Prasojo, R. A., & Suwarno. (2021). High voltage power transformer condition assessment considering the health index value and its decreasing rate. *High Voltage*, 6(2), 314–327. <https://doi.org/10.1049/hve2.12074>
- Tamma, W. R., Prasojo, R. A., & Suwarno, S. (2020). Assessment of High Voltage Power Transformer Aging Condition Based on Health Index Value Considering Its Apparent and Actual Age. *ICITEE 2020 - Proceedings of the 12th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering*, 292–296. <https://doi.org/10.1109/ICITEE49829.2020.9271778>
- Togatorop, P. R., Sianturi, M., Simamora, D., & Silaen, D. (2022). Optimizing Random Forest using Genetic Algorithm for Heart Disease Classification. *Lontar Komputer : Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi*, 13(1), 60. <https://doi.org/10.24843/lkjiti.2022.v13.i01.p06>

Halaman ini sengaja dikosongkan