

Optimalisasi Keputusan Jumlah Penyedia dan Alokasi Order Menggunakan Model Machine Learning di PT PLN (Persero): Studi Kasus Perencanaan Pengadaan Kontrak Kesepakatan Harga Satuan Transformator Tenaga

Firchi Ictiasha*, Budi Santosa

Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia

Email: firchiictiasha@gmail.com*

Keywords:

Procurement; Supplier Selection and Order Allocation (SSOA); Machine learning; Unit Price Contracts for Power Transformers; PT PLN (Persero).

ABSTRACT

Power transformer procurement at PT PLN (Persero) currently relies on the Final Evaluation Price approach, resulting in multidimensional supplier performance data not being optimally utilized in order allocation decisions. This study develops a machine learning-based Supplier Selection and Order Allocation (SSOA) framework using Decision Tree, Random Forest, and XGBoost algorithms with historical data of power transformer procurement for the 2023–2025 period. Supplier performance is modeled based on the dimensions of cost, timeliness, quality, and contractual risk to generate a supplier performance classification. The evaluation results indicate that Random Forest is selected as the best model with a macro-AUC value of 0.9882. The classification results indicate two suppliers in Tier 1, one provider in Tier 2, and three providers in Tier 3, and generate recommendations for one to three eligible suppliers for each transformer variant. This approach recommends a more objective and data-driven determination of the number of suppliers and order allocation compared to approaches solely oriented on price. This study successfully integrated a tree-based machine learning model with the Supplier Selection and Order Allocation (SSOA) framework using 18 variables from historical procurement data of PT PLN (Persero) for the period 2023–2025.

Kata Kunci:

Pengadaan; Supplier Selection and Order Allocation (SSOA); Machine learning; Kontrak Harga Satuan Transformator Tenaga; PT PLN (Persero).

ABSTRAK

Pengadaan transformator tenaga di PT PLN (Persero) saat ini masih mengandalkan pendekatan Harga Evaluasi Akhir sehingga data kinerja penyedia yang multidimensi belum dimanfaatkan secara optimal dalam keputusan alokasi pesanan. Penelitian ini mengembangkan kerangka kerja *Supplier Selection and Order Allocation (SSOA)* berbasis machine learning menggunakan algoritma Decision Tree, Random Forest, dan XGBoost dengan data historis pengadaan transformator tenaga periode 2023–2025. Kinerja penyedia dimodelkan berdasarkan dimensi biaya, ketepatan waktu, kualitas, dan risiko kontraktual untuk menghasilkan klasifikasi kinerja penyedia. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa Random Forest dipilih sebagai model terbaik dengan nilai macro-AUC sebesar 0,9882. Hasil klasifikasi menunjukkan dua penyedia berada pada Tier 1, satu penyedia pada Tier 2, dan tiga penyedia pada Tier 3, serta menghasilkan rekomendasi satu hingga tiga penyedia yang layak untuk setiap varian transformator. Pendekatan ini merekomendasikan penentuan jumlah penyedia dan alokasi order yang lebih objektif dan berbasis data dibandingkan pendekatan yang hanya berorientasi pada harga. Penelitian ini berhasil mengintegrasikan model tree-based machine learning dengan kerangka *Supplier Selection and Order Allocation (SSOA)* menggunakan 18 variabel dari data historis pengadaan PT PLN (Persero) periode 2023–2025

PENDAHULUAN

PT PLN (Persero) sebagai penyedia tenaga listrik nasional menghadapi tantangan dalam menjaga keandalan sistem transmisi melalui pengadaan transformator tenaga (Habiby, 2026; Maulana, 2024; Saragih, 2024; Shohibah, 2022; Wanti, 2023). Transformator berperan penting dalam pengaturan tegangan dan penyaluran daya pada sistem transmisi dan distribusi, serta merupakan aset bernilai tinggi dengan siklus pengadaan dan produksi panjang (Rahardian et al., 2024). Kesalahan dalam pemilihan penyedia dan alokasi order dapat menyebabkan keterlambatan proyek, peningkatan biaya, dan risiko tidak tercapainya *Commercial Operation Date* (COD).

Berdasarkan Peraturan Direksi PT PLN (Persero) Nomor 0018.P/DIR/2023, pengadaan transformator dilakukan melalui skema Kontrak Harga Satuan (KHS) dengan penyedia yang telah lolos kualifikasi dan tercantum dalam Daftar Penyedia Terseleksi (DPT). Penyedia dalam DPT telah memenuhi evaluasi teknis dan nonteknis seperti kapasitas produksi, spesifikasi, administrasi, kemampuan keuangan, dan garansi, sehingga ditetapkan sebagai pemenang dalam skema multi pemenang.

Pengadaan transformator tenaga dengan skema Kontrak Harga Satuan (KHS) di PT PLN (Persero) merupakan proses strategis yang mendukung keandalan sistem kelistrikan nasional (Adli, 2022; Togatorop, 2024). Selama ini, penentuan pemenang dilakukan melalui evaluasi administrasi, teknis, dan harga menggunakan indikator Harga Evaluasi Akhir (HEA) yang mempertimbangkan Tingkat Komponen Dalam Negeri (TKDN). Namun, aspek administrasi dan teknis hanya dinilai berdasarkan status lulus atau tidak lulus tanpa pembobotan kinerja, sehingga keputusan alokasi order lebih banyak ditentukan oleh harga terendah. Kondisi tersebut menyebabkan riwayat kinerja penyedia, seperti ketepatan waktu pengiriman, kualitas produk, kapasitas produksi, serta risiko kontraktual belum terintegrasi secara optimal dalam proses pengambilan keputusan (Putra et al., 2026; Putri, 2024; Siti, 2025). Akibatnya, pengadaan berpotensi mengalami inefisiensi, keterlambatan proyek, dan alokasi order yang kurang tepat, terutama pada skema pengadaan dengan banyak penyedia dan berbagai jenis transformator.

Permasalahan tersebut semakin terlihat dari kondisi pemenuhan kebutuhan transformator selama periode 2023–2025. Meskipun kebutuhan pada tahun 2023 dan 2024 dapat dipenuhi sepenuhnya, pada tahun 2025 realisasi pengadaan hanya mencapai sekitar 75,9% dari total kebutuhan sehingga menimbulkan backlog. Di sisi lain, harga transformator terus mengalami peningkatan pada berbagai spesifikasi utama, yang berdampak pada meningkatnya biaya produksi dan menurunnya kemampuan penyedia dalam memenuhi permintaan. Kenaikan harga tersebut juga menyebabkan penyedia lebih selektif dalam menerima volume pesanan, khususnya pada jenis transformator yang hanya dapat diproduksi oleh sedikit penyedia tersertifikasi. Kondisi ini menunjukkan perlunya mekanisme penentuan jumlah penyedia dan alokasi order yang lebih adaptif terhadap dinamika harga, kapasitas produksi, dan risiko pengadaan (Alhidayatullah, 2024; Azizah, 2025; Meridiana et al., 2026).

Selain dipengaruhi oleh faktor eksternal, proses pengambilan keputusan pengadaan juga belum memanfaatkan data historis secara optimal. Penentuan jumlah pemenang dan porsi alokasi order masih didasarkan pada kebijakan internal dan penilaian manual terhadap dokumen kualitatif, sementara informasi mengenai keterlambatan pengiriman, kualitas produk, klaim garansi, penalti, dan kinerja kontraktual belum diolah secara sistematis. Padahal,

kompleksitas data pengadaan PT PLN (Persero) yang mencakup berbagai tahun, jenis transformator, dan penyedia memerlukan pendekatan berbasis data agar keputusan lebih objektif, konsisten, dan mudah direplikasi. Literatur manajemen rantai pasok juga menegaskan bahwa pemilihan penyedia seharusnya mempertimbangkan keseimbangan antara biaya, kualitas, ketepatan waktu, kapasitas, dan risiko, bukan hanya harga terendah.

Perkembangan teknologi machine learning memberikan peluang untuk meningkatkan kualitas pengambilan keputusan dalam pengadaan. Berbagai algoritma, seperti Decision Tree, Random Forest, dan XGBoost, mampu mempelajari pola hubungan yang kompleks dari data historis sehingga dapat memprediksi kinerja penyedia secara lebih objektif dibandingkan metode berbasis penilaian subjektif. Sejumlah penelitian terdahulu menunjukkan bahwa machine learning telah berhasil diterapkan dalam evaluasi penyedia, peramalan permintaan, serta pengambilan keputusan pada berbagai sektor industri. Namun demikian, sebagian besar penelitian masih memisahkan proses evaluasi penyedia dengan proses penentuan jumlah penyedia dan alokasi order, sehingga integrasi antara machine learning dan konsep Supplier Selection and Order Allocation (SSOA) masih relatif terbatas.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengembangkan kerangka pengambilan keputusan yang mengintegrasikan model machine learning dengan konsep Supplier Selection and Order Allocation (SSOA) untuk menentukan jumlah penyedia dan alokasi order transformator tenaga di PT PLN (Persero). Model machine learning digunakan untuk memodelkan kinerja penyedia berdasarkan empat dimensi utama, yaitu biaya, kualitas, ketepatan waktu, dan risiko kegagalan kontrak, sedangkan kerangka SSOA dimanfaatkan untuk menyusun rekomendasi jumlah penyedia dan distribusi alokasi order yang optimal. Penelitian ini juga membandingkan performa tiga algoritma tree-based, yaitu Decision Tree, Random Forest, dan XGBoost, sehingga diperoleh model dengan tingkat akurasi terbaik dalam memprediksi kinerja penyedia berdasarkan data historis pengadaan tahun 2023–2025.

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi baik secara teoretis maupun praktis. Secara teoretis, penelitian memperkaya pengembangan konsep Supplier Selection and Order Allocation melalui integrasi machine learning berbasis data historis dalam proses pengambilan keputusan pengadaan. Secara praktis, hasil penelitian diharapkan menjadi sistem pendukung keputusan bagi PT PLN (Persero) dalam menentukan jumlah pemenang dan porsi alokasi order yang lebih objektif, transparan, dan adaptif terhadap dinamika kinerja penyedia. Selain itu, penelitian ini diharapkan mampu membantu mengurangi risiko backlog pengadaan, meningkatkan efisiensi rantai pasok, serta menjadi acuan dalam pengembangan sistem pengadaan berbasis analitik data pada pengadaan peralatan strategis lainnya di lingkungan PT PLN (Persero).

METODE

Metoda Pengolahan dan Analisis Data

Tahap pengumpulan data mengacu pada Santosa (2023) yang meliputi seleksi data, data cleaning, dan transformasi data. Data yang digunakan berasal dari dokumen pengadaan transformator tenaga PT PLN (Persero) periode 2023–2025, meliputi data HEA, kinerja kontraktual, kapasitas penyedia DPT, dan kebutuhan transformator. Selanjutnya dilakukan pra-pemrosesan data melalui penanganan missing values, normalisasi menggunakan Min-Max Scaling, serta pembagian data pelatihan dan pengujian dengan metode stratified split (80:20).

Untuk mengatasi ketidakseimbangan kelas dan meningkatkan performa model, digunakan teknik threshold moving, Repeated Stratified K-Fold Cross Validation sehingga dataset siap digunakan dalam pemodelan machine learning dengan hasil yang lebih akurat dan stabil.

Pemodelan *Machine learning*

Penelitian ini menggunakan tiga algoritma tree-based machine learning, yaitu Decision Tree, Random Forest, dan XGBoost, untuk mengklasifikasikan kinerja penyedia berdasarkan data historis pengadaan transformator tenaga di PT PLN (Persero). Decision Tree dipilih karena mudah diinterpretasikan, Random Forest karena menghasilkan prediksi yang lebih stabil dan mampu mengurangi overfitting, sedangkan XGBoost dipilih karena memiliki akurasi tinggi dalam mengolah data tabular yang kompleks. Ketiga model dioptimalkan menggunakan GridSearchCV dan divalidasi dengan Repeated Stratified K-Fold Cross Validation untuk memperoleh performa terbaik. Model dievaluasi menggunakan macro AUC dan macro F1-score, kemudian model dengan hasil terbaik dipilih sebagai dasar dalam menentukan jumlah penyedia dan alokasi order. Seluruh proses pemodelan dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python dengan pustaka scikit-learn dan XGBoost.

Proses Diskritisasi Skor Komposit menjadi Label Kelas

Keluaran utama dari pemodelan machine learning dalam penelitian ini adalah prediksi kelas kinerja penyedia yang diklasifikasikan ke dalam kategori High Performer, Medium Performer, dan Low Performer. Proses ini diawali dengan menghitung skor kinerja komposit setiap penyedia berdasarkan data historis yang telah dinormalisasi, kemudian skor tersebut dikonversi menjadi label kelas sesuai standar evaluasi kinerja kontraktual PT PLN (Persero). Selanjutnya, model machine learning yang telah dilatih menggunakan data historis digunakan untuk memprediksi kelas kinerja penyedia baru berdasarkan karakteristik data yang dimiliki. Hasil klasifikasi ini menjadi dasar dalam mendukung penentuan prioritas penyedia dan alokasi order pada skema *Supplier Selection and Order Allocation (SSOA)*.

Evaluasi Model

Evaluasi model dalam penelitian ini menggunakan beberapa metrik, yaitu akurasi, precision, recall, F1-score, dan *Area Under the Curve* (AUC). Akurasi digunakan untuk mengukur tingkat ketepatan prediksi secara keseluruhan, sedangkan precision menunjukkan ketepatan model dalam mengidentifikasi penyedia berkinerja tertentu. Recall mengukur kemampuan model dalam menemukan seluruh penyedia yang termasuk dalam suatu kelas, sementara F1-score digunakan sebagai ukuran gabungan antara precision dan recall, terutama pada data yang tidak seimbang. Selain itu, AUC dengan pendekatan one-vs-rest dan macro average digunakan untuk menilai kemampuan model dalam membedakan setiap kelas kinerja penyedia (High, Medium, dan Low Performer). Model dievaluasi menggunakan Akurasi, Presisi, Recall, F1-Score (macro), dan Macro AUC. F1-Score dipilih untuk mengukur ketepatan prediksi pada data yang tidak seimbang. Macro AUC digunakan sebagai indikator utama pemilihan model terbaik karena kemampuannya dalam membedakan antar kelas pada klasifikasi multikelas.

Analisis dan Pembahasan

Tahap analisis dan pembahasan pada Bab IV dilakukan melalui tiga tahap utama. Pertama, menyajikan statistik deskriptif untuk menggambarkan karakteristik data, distribusi fitur, dan profil kinerja penyedia. Kedua, membandingkan performa tiga algoritma machine learning (Decision Tree, Random Forest, dan XGBoost) berdasarkan metrik akurasi, precision,

recall, F1-score, dan macro AUC, serta menganalisis tingkat kepentingan setiap variabel pada model terbaik. Ketiga, menggunakan hasil prediksi model terbaik untuk menyusun skenario jumlah penyedia dan alokasi order berdasarkan tingkat kinerja, kemudian membandingkannya dengan pola alokasi historis PT PLN (Persero) melalui indikator persentase alokasi, risiko keterlambatan, risiko kualitas, distribusi alokasi, dan potensi pengurangan backlog. Selain itu, dilakukan analisis sensitivitas untuk menguji ketahanan hasil penelitian terhadap perubahan bobot penilaian, batas klasifikasi, dan bobot alokasi penyedia. Hasil analisis sensitivitas digunakan untuk memastikan bahwa rekomendasi yang dihasilkan tetap konsisten dan andal meskipun terjadi perubahan pada parameter utama yang digunakan dalam model.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Performa Model

Tiga *algoritma tree-based* (*Decision Tree*, *Random Forest*, *XGBoost*) dievaluasi menggunakan *Repeated Stratified K-Fold CV* dan *hyperparameter tuning*.

Tabel 1 Hasil Evaluasi Model

Model	Akurasi	F1_Macro	F1_Low	F1_Medium	F1_High	Macro_AUC
Decision Tree	0.9167	0.8928	0.7692	0.9091	1.000	0.9137
Random Forest	0.8889	0.8691	0.7692	0.8750	0.963	0.9882
XGBoost	0.8333	0.8243	0.7692	0.8235	0.880	0.9613

Model Random Forest dipilih sebagai yang terbaik karena mencapai Macro AUC tertinggi (0.9882), mengindikasikan kemampuan diskriminasi kelas yang sangat baik, meskipun Decision Tree memiliki akurasi dan F1-score tertinggi.

Analisis *feature importance* pada model Random Forest menunjukkan bahwa Rasio TKDN (X₉) memiliki kontribusi paling signifikan (0.2046), diikuti oleh rata-rata hari keterlambatan (X₄), rasio HEA/HPS (X₁), dan persentase pengiriman tepat waktu (X₅). Hal ini menunjukkan bahwa kinerja penyedia dalam konteks ini sangat dipengaruhi oleh kepatuhan regulasi, ketepatan waktu, efisiensi biaya, dan kualitas produk.

Hasil Klasifikasi

Klasifikasi Penyedia dalam Tier

Berdasarkan hasil integrasi antara model *machine learning* dan metode *Supplier Selection Order Allocation* (SSOA), diperoleh klasifikasi penyedia ke dalam tiga *tier* yang merepresentasikan tingkat prioritas dalam alokasi order. Klasifikasi ini didasarkan pada hasil prediksi kinerja penyedia.

Tabel 2 Klasifikasi Penyedia dalam Tier

Penyedia	ML Output	Tier SSOA
PT Bambang Djaja	<i>Low Performer</i> (0)	<i>Tier 3</i>
PT Elsewedy Electric Indonesia	<i>High Performer</i> (2)	<i>Tier 1</i>
PT Sintra Sinarindo Elektrik	<i>Low Performer</i> (0)	<i>Tier 3</i>
PT Trafoindo Power Indonesia	<i>Low Performer</i> (0)	<i>Tier 3</i>
PT Unelec Indonesia (UNINDO)	<i>High Performer</i> (2)	<i>Tier 1</i>

Hasil klasifikasi menunjukkan bahwa penyedia terbagi ke dalam tiga tier berdasarkan hasil prediksi model *machine learning*. PT Elsewedy Electric Indonesia dan PT Unelec Indonesia (UNINDO) diklasifikasikan sebagai *High Performer* (Tier 1) sehingga menjadi penyedia dengan prioritas tertinggi dalam proses alokasi order. PT XD Sakti Indonesia diklasifikasikan sebagai *Medium Performer* (Tier 2), yang menunjukkan bahwa penyedia memiliki tingkat kinerja yang baik namun berada di bawah penyedia pada Tier 1 sehingga tetap dipertimbangkan sebagai alternatif dalam alokasi order. Sementara itu, PT Bambang Djaja, PT Sintra Sinarindo Elektrik, dan PT Trafoindo Power Indonesia diklasifikasikan sebagai *Low Performer* (Tier 3), yang mengindikasikan bahwa ketiga penyedia tersebut memiliki prioritas terendah dalam proses alokasi order berdasarkan hasil prediksi model. Klasifikasi ini selanjutnya menjadi dasar dalam penerapan metode *Supplier Selection Order Allocation* (SSOA) untuk menentukan jumlah penyedia yang dipilih serta proporsi alokasi order pada masing-masing penyedia sesuai dengan tingkat prioritas yang dihasilkan oleh model.

Jumlah Penyedia per Jenis Trafo

Berdasarkan hasil klasifikasi kinerja penyedia menggunakan model *machine learning* menunjukkan bahwa terdapat dua penyedia yang termasuk kategori *High Performer*, satu penyedia berada pada kategori *Medium Performer*, dan tiga penyedia lainnya termasuk kategori *Low Performer*. Klasifikasi tersebut kemudian diintegrasikan ke dalam kerangka *Supplier Selection and Order Allocation* (SSOA), di mana kategori *High Performer* dipetakan sebagai *Tier 1* dengan prioritas tertinggi, *Medium Performer* sebagai *Tier 2*, dan *Low Performer* sebagai *Tier 3*. Dalam penelitian ini, hanya penyedia yang berada pada *Tier 1* dan *Tier 2* yang dijadikan kandidat dalam proses seleksi dan alokasi order karena dinilai memiliki tingkat kinerja yang memenuhi kriteria rekomendasi model. Sementara itu, penyedia yang termasuk *Tier 3* tidak diprioritaskan dalam proses alokasi order mengingat hasil klasifikasi menunjukkan tingkat kinerja yang relatif lebih rendah. Berdasarkan hasil klasifikasi tersebut, selanjutnya dilakukan identifikasi kandidat penyedia yang direkomendasikan untuk masing-masing varian transformator tenaga sebagai dasar penentuan jumlah penyedia pada proses *Supplier Selection and Order Allocation* (SSOA). Hasil identifikasi tersebut disajikan pada tabel berikut.

Tabel 3 Kandidat Penyedia per Jenis Trafo

Varian Trafo	Jumlah Kandidat Layak	Penyedia Direkomendasikan
150/22 kV 60 MVA AIS	3	PT Elsewedy Electric Indonesia, PT Unelec Indonesia (UNINDO), PT XD Sakti Indonesia
150/22 kV 60 MVA GIS	2	PT Sintra Sinarindo Elektrik, PT Unelec Indonesia (UNINDO)
150/66 kV 100 MVA GIS	1	PT Unelec Indonesia (UNINDO)
500/168 kV 167 MVA AIS	2	PT Bambang Djaja, PT XD Sakti Indonesia

Berdasarkan hasil klasifikasi tersebut, dilakukan identifikasi jumlah penyedia yang layak untuk setiap varian transformator. Pada varian 150/22 kV 60 MVA AIS, terdapat tiga penyedia yang termasuk dalam kategori layak, yaitu PT Elsewedy Electric Indonesia, PT Unelec Indonesia (UNINDO), dan PT XD Sakti Indonesia. Jumlah ini menunjukkan bahwa varian

tersebut memiliki tingkat kompetisi yang relatif baik serta memungkinkan penerapan strategi diversifikasi risiko secara optimal melalui *multi-supplier*.

Pada varian 150/22 kV 60 MVA GIS, terdapat dua penyedia yang direkomendasikan, yaitu PT Sintra Sinarindo Elektrik dan PT Unelec Indonesia (UNINDO). Jumlah ini telah memenuhi prinsip minimal dua penyedia dalam kebijakan pengadaan, sehingga risiko keterlambatan atau kegagalan pasokan dapat diminimalkan melalui pembagian alokasi order. Sementara itu, pada varian 500/168 kV 167 MVA AIS, juga terdapat dua penyedia yang layak, yaitu PT Bambang Djaja dan PT XD Sakti Indonesia. Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun jumlah penyedia tidak banyak, namun masih memungkinkan adanya diversifikasi yang cukup untuk menjaga stabilitas pasokan.

Berbeda dengan varian lainnya, pada 150/66 kV 100 MVA GIS hanya terdapat satu penyedia yang memenuhi kriteria, yaitu PT Unelec Indonesia (UNINDO). Kondisi ini menunjukkan adanya keterbatasan basis penyedia untuk varian tersebut, sehingga menimbulkan risiko ketergantungan yang tinggi terhadap satu vendor. Situasi ini berpotensi meningkatkan eksposur risiko operasional, terutama jika terjadi gangguan pada penyedia tersebut. Oleh karena itu, diperlukan strategi mitigasi seperti pengembangan penyedia baru atau penguatan kontrak jangka panjang.

Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa jumlah penyedia yang direkomendasikan idealnya berada pada kisaran dua hingga tiga penyedia per varian untuk mencapai keseimbangan antara efisiensi dan diversifikasi risiko. Selain itu, kemunculan PT Unelec Indonesia (UNINDO) pada beberapa varian mengindikasikan bahwa penyedia tersebut memiliki kapabilitas yang relatif konsisten pada berbagai jenis transformator tenaga. Namun, tidak ditemukan penyedia dengan kategori kinerja tinggi (*high performer*), yang menunjukkan bahwa secara keseluruhan performa vendor masih berada pada tingkat menengah, sehingga masih terdapat peluang untuk peningkatan kualitas dalam sistem pengadaan.

Analisis Sensitivitas dan Robustness Rekomendasi

Untuk menilai kredibilitas rekomendasi yang dihasilkan, dilakukan analisis sensitivitas tiga level guna menguji apakah perubahan parameter input mengubah kesimpulan secara substantif. Pengujian ini mengikuti kerangka *sensitivity analysis* yang direkomendasikan oleh Polo-Triana et al. (2024) untuk *rule-based decision framework* dalam manajemen rantai pasok, dengan variasi parameter sebesar $\pm 10\%$ mengacu pada Saltelli (2008) dan Hayati et al. (2025).

Pada Level 1, bobot keempat dimensi kinerja divariasikan sebesar $\pm 10\%$ dari nilai *baseline* secara bergantian untuk menguji stabilitas klasifikasi tier penyedia. Hasil pengujian disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4 Hasil Analisis Sensitivitas Level 1

Penyedia	Tier Baseline	Teknis +10%	Teknis - 10%	Waktu +10%	Waktu - 10%	Status L1
PT Elsewedy Electric Indonesia	H	H	M	H	M	Tidak Robust
PT Bambang Djaja	L	L	L	L	L	Robust
PT XD Sakti Indonesia	M	M	M	M	M	Robust
PT Unelec Indonesia (UNINDO)	M	L	M	M	L	Tidak Robust

PT Sintra Sinarindo Elektrik	M	M	M	M	M	Robust
PT Trafoindo Power Indonesia	L	L	L	L	L	Robust

Berdasarkan hasil analisis sensitivitas Level 1 menunjukkan bahwa empat dari enam penyedia, yaitu PT Bambang Djaja, PT XD Sakti Indonesia, PT Sintra Sinarindo Elektrik, dan PT Trafoindo Power Indonesia, mempertahankan klasifikasi tier yang sama pada seluruh skenario variasi bobot dimensi teknis dan waktu sebesar $\pm 10\%$, sehingga dinyatakan *robust*. Sebaliknya, PT Elsewedy Electric Indonesia dan PT Unelec Indonesia (UNINDO) mengalami perubahan klasifikasi pada beberapa skenario sehingga dikategorikan sebagai tidak *robust*. PT Elsewedy Electric Indonesia berubah dari kategori *High* menjadi *Medium* ketika bobot dimensi teknis maupun waktu diturunkan sebesar 10%, sedangkan PT Unelec Indonesia (UNINDO) berubah dari kategori *Medium* menjadi *Low* pada kondisi yang sama. Hasil ini menunjukkan bahwa perubahan prioritas pada dimensi teknis dan waktu dapat memengaruhi klasifikasi kedua penyedia tersebut, sedangkan klasifikasi empat penyedia lainnya relatif stabil terhadap variasi bobot yang diuji. Dengan demikian, mayoritas penyedia menunjukkan tingkat *robustness* yang baik terhadap perubahan bobot kriteria dalam model.

Pada Level 2, nilai *threshold* klasifikasi divariasikan sebesar ± 5 poin *threshold* standar *Composite Performance Score* (80/60) untuk mengevaluasi sensitivitas hasil klasifikasi terhadap perubahan batas kategori. Variasi tersebut menghasilkan tiga skenario, yaitu *baseline* (80/60), skenario ketat (85/65), dan skenario longgar (75/55), mengacu pada Ghorabae (2023) dan Shirkouhi et al. (2023). Hasil analisis sensitivitas disajikan pada tabel berikut.

Tabel 5 Hasil Analisis Sensitivitas Level 2

Penyedia	Skor	Tier Baseline (80/60)	Tier Ketat (85/65)	Tier Longgar (75/55)	Status L2
PT Elsewedy Electric Indonesia	80,4	H	M	H	Tidak Robust
PT Bambang Djaja	54,8	L	L	L	Robust
PT XD Sakti Indonesia	70,4	M	M	M	Robust
PT Unelec Indonesia (UNINDO)	62,5	M	L	M	Tidak Robust
PT Sintra Sinarindo Elektrik	52,7	L	L	H	Tidak Robust
PT Trafoindo Power Indonesia	28,3	L	L	L	Robust

Berdasarkan hasil analisis sensitivitas Level 2 menunjukkan bahwa PT Bambang Djaja, PT XD Sakti Indonesia, dan PT Trafoindo Power Indonesia mempertahankan klasifikasi tier yang sama pada seluruh skenario perubahan *threshold*, sehingga dikategorikan sebagai *robust*. Sebaliknya, PT Elsewedy Electric Indonesia, PT Unelec Indonesia (UNINDO), dan PT Sintra Sinarindo Elektrik mengalami perubahan klasifikasi pada salah satu skenario *threshold*, sehingga dikategorikan sebagai tidak *robust*. PT Elsewedy Electric Indonesia berubah dari kategori *High* menjadi *Medium* pada skenario *threshold* ketat (85/65), PT Unelec Indonesia (UNINDO) berubah dari *Medium* menjadi *Low*, sedangkan PT Sintra Sinarindo Elektrik berubah dari *Low* menjadi *High* pada skenario *threshold* longgar (75/55). Perubahan tersebut menunjukkan bahwa klasifikasi ketiga penyedia lebih sensitif terhadap perubahan batas

kategori dibandingkan penyedia lainnya. Meskipun demikian, sebanyak tiga dari enam penyedia tetap mempertahankan klasifikasi yang konsisten pada seluruh skenario, sehingga hasil klasifikasi secara keseluruhan masih menunjukkan tingkat kestabilan yang memadai terhadap perubahan *threshold*.

Pada Level 3, dilakukan evaluasi terhadap tiga skenario kombinasi bobot tier alokasi SSOA konservatif (0,70/0,20/0,10), moderat (0,60/0,30/0,10), agresif (0,50/0,35/0,15). Evaluasi dilakukan menggunakan indikator *Total Weighted Score* (TWS) untuk mengidentifikasi skenario alokasi yang memberikan hasil terbaik sekaligus menguji kestabilan rekomendasi terhadap perubahan bobot alokasi. Hasil analisis sensitivitas Level 3 disajikan pada tabel berikut.

Tabel 6 Hasil Analisis Sensitivitas Level 3

Skenario	TWS	Rank	Skenario Terbaik	Status L3
Konservatif	72,8	1	Terbaik	Skenario Optimal
Moderat	71,0	2	-	-
Agresif	68,1	3	-	-

Berdasarkan hasil analisis sensitivitas Level 3 menunjukkan bahwa skenario konservatif memperoleh nilai *Total Weighted Score* (TWS) tertinggi sebesar 72,8, sehingga menempati peringkat pertama dan ditetapkan sebagai skenario terbaik. Selanjutnya, skenario moderat memperoleh nilai TWS sebesar 71,0 dan berada pada peringkat kedua, sedangkan skenario agresif memperoleh nilai TWS sebesar 68,1 sehingga berada pada peringkat ketiga. Hasil tersebut menunjukkan bahwa skenario konservatif memberikan kombinasi bobot alokasi yang paling optimal dibandingkan dua skenario lainnya.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model pengambilan keputusan yang mampu mengevaluasi kinerja penyedia transformator tenaga secara lebih komprehensif dibandingkan pendekatan pengadaan yang selama ini lebih berorientasi pada aspek harga. Untuk mencapai tujuan tersebut, penelitian memanfaatkan data historis pengadaan transformator tenaga PT PLN (Persero) periode 2023–2025 yang mencakup dimensi biaya, ketepatan waktu, kualitas, risiko kontrak, kapasitas, dan pengalaman penyedia. Seluruh dimensi tersebut direpresentasikan ke dalam 18 variabel input yang akan digunakan sebagai dasar pembentukan model *machine learning* berbasis *tree-based*. Pendekatan ini memungkinkan berbagai aspek kinerja penyedia yang sebelumnya dievaluasi secara terpisah dapat diintegrasikan ke dalam satu kerangka penilaian yang lebih objektif dan berbasis data.

Hasil statistik deskriptif menunjukkan bahwa data penelitian memiliki tingkat variasi yang cukup tinggi pada beberapa variabel, khususnya yang berkaitan dengan keterlambatan pengiriman, kapasitas operasional, dan pengalaman penyedia. Variasi tersebut mengindikasikan adanya perbedaan karakteristik dan kemampuan antar penyedia yang dapat dimanfaatkan oleh model *machine learning* untuk membangun pola klasifikasi kinerja. Pada tahap pembentukan variabel target, distribusi awal menunjukkan ketidakseimbangan kelas (*class imbalance*), sehingga dilakukan penyesuaian *threshold* untuk memperoleh distribusi kelas yang lebih proporsional. Distribusi yang lebih seimbang tersebut memberikan representasi yang lebih baik bagi setiap kategori kinerja sehingga mendukung proses pembelajaran model klasifikasi secara lebih optimal.

Berdasarkan hasil evaluasi model, ketiga algoritma yang digunakan menunjukkan kemampuan yang baik dalam mengklasifikasikan kinerja penyedia. *Decision Tree*

menghasilkan nilai akurasi, presisi, *recall*, dan *F1-score* tertinggi. Sementara *Random Forest* dan *XGBoost* juga menunjukkan performa yang sangat baik, terutama dari sisi kemampuan diskriminasi kelas yang tercermin pada nilai *Area Under the Curve* (AUC). Hasil tersebut menunjukkan bahwa seluruh algoritma mampu mempelajari pola hubungan antarvariabel dalam data pengadaan transformator tenaga secara efektif, meskipun karakteristik data memiliki tingkat variasi yang cukup tinggi.

Meskipun Decision Tree menghasilkan nilai akurasi dan F1-score tertinggi, penelitian ini menetapkan Random Forest sebagai model terbaik karena memperoleh nilai macro AUC tertinggi sebesar 0,9882. Dalam penelitian ini, AUC digunakan sebagai indikator utama dalam pemilihan model karena lebih mampu menggambarkan kemampuan model dalam membedakan setiap kategori kinerja penyedia pada permasalahan klasifikasi multikelas. Nilai AUC Random Forest yang berada pada kategori excellent classification menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan diskriminasi yang sangat baik dalam membedakan penyedia dengan tingkat kinerja yang berbeda. Oleh karena itu, Random Forest dipilih sebagai model yang digunakan pada tahap klasifikasi penyedia dan pengembangan rekomendasi Supplier Selection Order Allocation (SSOA).

Analisis *feature importance* pada model Random Forest menunjukkan bahwa Rasio TKDN merupakan variabel yang memberikan kontribusi terbesar dalam proses klasifikasi kinerja penyedia. Temuan ini menunjukkan bahwa tingkat pemenuhan kandungan dalam negeri menjadi salah satu faktor utama yang dipertimbangkan model dalam membedakan tingkat kinerja penyedia. Selain Rasio TKDN, variabel rata-rata hari keterlambatan, rasio HEA/HPS, dan persentase pengiriman tepat waktu juga memberikan kontribusi yang relatif besar terhadap hasil klasifikasi. Hal ini mengindikasikan bahwa model tidak hanya mempertimbangkan aspek biaya, tetapi juga memperhatikan kepatuhan terhadap kebijakan TKDN serta kinerja operasional penyedia dalam memenuhi komitmen waktu pengiriman.

Secara keseluruhan, hasil tersebut menunjukkan bahwa evaluasi penyedia yang efektif memerlukan pendekatan multidimensi yang mengintegrasikan aspek kebijakan, efisiensi biaya, dan ketepatan waktu pengiriman. Dengan mempertimbangkan berbagai dimensi tersebut secara simultan, model *machine learning* mampu menghasilkan proses klasifikasi yang lebih komprehensif dibandingkan pendekatan yang hanya berorientasi pada harga.

Setelah model terbaik diperoleh, hasil klasifikasi penyedia diintegrasikan ke dalam kerangka *Supplier Selection and Order Allocation* (SSOA) sebagai dasar penentuan prioritas penyedia. Integrasi ini dilakukan dengan memetakan hasil klasifikasi *machine learning* ke dalam tier penyedia yang mencerminkan tingkat prioritas dalam alokasi order. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dua penyedia, yaitu PT Elsewedy Electric Indonesia dan PT Unelec Indonesia (UNINDO), diklasifikasikan sebagai *High Performer* (Tier 1), PT XD Sakti Indonesia sebagai *Medium Performer* (Tier 2), sedangkan PT Bambang Djaja, PT Sintra Sinarindo Elektrik, dan PT Trafoindo Power Indonesia termasuk dalam kategori *Low Performer* (Tier 3). Klasifikasi tersebut menunjukkan bahwa model mampu membedakan tingkat kinerja penyedia berdasarkan berbagai dimensi evaluasi sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam menetapkan prioritas penyedia pada proses alokasi order.

Hasil integrasi antara model *machine learning* dan *Supplier Selection and Order Allocation* (SSOA) menghasilkan rekomendasi jumlah penyedia yang berbeda untuk setiap varian transformator tenaga. Pada beberapa varian direkomendasikan dua hingga tiga penyedia

sehingga memungkinkan penerapan strategi *multi-supplier* untuk meningkatkan fleksibilitas pengadaan dan mengurangi risiko ketergantungan pada satu penyedia. Sebaliknya, pada varian 150/66 kV 100 MVA GIS hanya terdapat satu penyedia yang memenuhi kriteria rekomendasi, sehingga berpotensi meningkatkan risiko konsentrasi pasokan apabila penyedia tersebut mengalami kendala operasional. Temuan ini menunjukkan bahwa keputusan mengenai jumlah penyedia tidak dapat diseragamkan untuk seluruh jenis transformator, tetapi perlu disesuaikan dengan karakteristik kebutuhan serta ketersediaan penyedia yang memenuhi kriteria pada masing-masing varian transformator tenaga.

Dari perspektif pengelolaan rantai pasok, rekomendasi penggunaan dua hingga tiga penyedia pada sebagian besar varian transformator memberikan keseimbangan antara efisiensi pengadaan dan mitigasi risiko pasokan. Jumlah penyedia yang terlalu sedikit berpotensi meningkatkan risiko keterlambatan maupun gangguan pasokan apabila salah satu penyedia mengalami kendala, sebagaimana terlihat pada varian yang hanya memiliki satu penyedia yang direkomendasikan. Sebaliknya, jumlah penyedia yang terlalu banyak dapat meningkatkan kompleksitas pengelolaan kontrak dan mengurangi konsentrasi volume order yang berpotensi memberikan efisiensi biaya. Oleh karena itu, rekomendasi jumlah penyedia yang dihasilkan dalam penelitian ini dapat menjadi dasar bagi PT PLN (Persero) dalam menyusun strategi pengadaan yang lebih adaptif sesuai dengan karakteristik masing-masing varian transformator tenaga.

Salah satu keterbatasan substansial yang perlu diakui dalam penelitian ini adalah minimnya observasi pada kategori *High Performer* pada distribusi awal data. Dari total 119 observasi, hanya terdapat 2 data yang tergolong *High Performer*. Kondisi tersebut menyebabkan representasi kelas *High Performer* menjadi sangat terbatas sehingga model *machine learning* memiliki contoh yang relatif sedikit untuk mempelajari karakteristik penyedia dengan kinerja tertinggi. Keterbatasan ini berpotensi memengaruhi kemampuan model dalam mengenali pola pada kelas *High Performer*. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan penyesuaian *threshold* pembentukan variabel target untuk meningkatkan representasi kelas minoritas sebagaimana dijelaskan pada Subbab 4.2.1.2. Meskipun penyesuaian tersebut menghasilkan distribusi kelas yang lebih proporsional, jumlah observasi yang relatif terbatas tetap menjadi salah satu keterbatasan yang perlu dipertimbangkan dalam menginterpretasikan hasil penelitian.

Keterbatasan jumlah observasi tersebut juga perlu dipertimbangkan dalam menginterpretasikan hasil evaluasi model. Meskipun model *Random Forest* menghasilkan nilai macro AUC sebesar 0,9882 yang termasuk dalam kategori *excellent classification*, nilai tersebut belum sepenuhnya mencerminkan kemampuan model dalam membedakan ketiga kelas secara seimbang. Dalam pendekatan one-vs-rest, kontribusi kelas *High Performer* terhadap nilai macro AUC relatif kecil karena jumlah observasinya sangat terbatas. Oleh karena itu, nilai AUC yang tinggi lebih banyak merefleksikan kemampuan model dalam membedakan kelas yang memiliki representasi data lebih besar, sedangkan kemampuan model dalam mengidentifikasi penyedia dengan kategori *High Performer* masih perlu diinterpretasikan secara hati-hati. Dengan demikian, penambahan jumlah data historis pada penelitian selanjutnya diharapkan dapat meningkatkan kemampuan model dalam mempelajari karakteristik setiap kelas secara lebih seimbang.

Perbandingan Skenario Alokasi SSOA dan Panduan Penggunaan bagi PLN

Penelitian ini menyimulasikan tiga skenario alokasi order SSOA yang merepresentasikan preferensi risiko pengadaan yang berbeda, yaitu skenario konservatif, moderat, dan agresif. Masing-masing skenario menggunakan kombinasi bobot *supplier tier* yang berbeda untuk mendistribusikan volume order kepada penyedia yang telah diklasifikasikan menggunakan model *machine learning*. Skenario konservatif mengalokasikan 70% order kepada Tier 1, 20% kepada Tier 2, dan 10% kepada Tier 3 sehingga memberikan prioritas terbesar kepada penyedia dengan tingkat kinerja tertinggi. Skenario moderat mengalokasikan 60% kepada Tier 1, 30% kepada Tier 2, dan 10% kepada Tier 3, mencerminkan keseimbangan antara keandalan dan diversifikasi. Sementara skenario agresif mengalokasikan 50% kepada Tier 1, 35% kepada Tier 2, dan 15% kepada Tier 3, memprioritaskan diversifikasi dan pengembangan basis penyedia secara lebih merata. Dapat dilihat bahwa skenario moderat dan agresif secara bertahap meningkatkan proporsi alokasi kepada penyedia pada tier yang lebih rendah sebagai upaya memperluas diversifikasi penyedia dan mendorong pengembangan kapasitas pemasok dalam jangka panjang.

Hasil evaluasi menggunakan *Decision Matrix* dengan empat kriteria terbobot, yaitu eksposur risiko keterlambatan (40%), eksposur risiko kualitas (30%), diversifikasi alokasi (20%), dan efisiensi biaya (10%), menunjukkan bahwa skenario konservatif memperoleh Total *Weighted Score* (TWS) tertinggi sebesar 72,8 sehingga dipilih sebagai skenario optimal. Temuan ini menunjukkan bahwa pada konteks pengadaan transformator tenaga PT PLN (Persero), pengurangan risiko operasional memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap kualitas keputusan dibandingkan peningkatan diversifikasi penyedia. Dominasi bobot pada aspek risiko keterlambatan dan kualitas mencerminkan bahwa kegagalan penyedia dalam memenuhi jadwal pengiriman maupun spesifikasi teknis memiliki konsekuensi yang jauh lebih besar dibandingkan manfaat yang diperoleh dari pemerataan alokasi order.

Keunggulan skenario konservatif juga dipengaruhi oleh karakteristik hasil klasifikasi penyedia yang menunjukkan bahwa hanya sebagian penyedia yang termasuk dalam kategori Tier 1, sedangkan penyedia lainnya berada pada Tier 2 dan Tier 3. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa penyedia dengan tingkat kinerja tertinggi masih relatif terbatas sehingga pemberian proporsi alokasi yang lebih besar kepada Tier 1 menjadi strategi yang lebih rasional untuk meminimalkan risiko operasional. Di sisi lain, penyedia pada Tier 2 tetap dapat dimanfaatkan sebagai alternatif untuk menjaga fleksibilitas pasokan, sedangkan penyedia Tier 3 lebih tepat diposisikan sebagai pilihan cadangan sesuai kebutuhan pengadaan. Dengan demikian, hasil penelitian tidak hanya menunjukkan bahwa skenario konservatif menghasilkan nilai *Total Weighted Score* (TWS) tertinggi, tetapi juga mengindikasikan bahwa strategi pengadaan yang lebih berorientasi pada pengendalian risiko merupakan pendekatan yang paling sesuai dalam pengadaan transformator tenaga PT PLN (Persero).

Apabila dibandingkan dengan skenario moderat dan agresif, keunggulan skenario konservatif terletak pada kemampuannya mengurangi eksposur risiko terhadap penyedia yang memiliki tingkat keandalan lebih rendah. Skenario moderat memang memberikan peluang yang lebih besar bagi penyedia *Tier 2* untuk memperoleh pengalaman dan meningkatkan kapasitas, sedangkan skenario agresif memperluas diversifikasi alokasi sebagai upaya mengurangi ketergantungan terhadap penyedia tertentu. Namun, peningkatan diversifikasi tersebut diikuti oleh meningkatnya proporsi order kepada penyedia dengan tingkat risiko yang

relatif lebih tinggi. Pada pengadaan transformator tenaga yang merupakan material strategis dengan waktu pengadaan panjang (*long lead time*) dan berdampak langsung terhadap keandalan sistem transmisi, peningkatan risiko tersebut berpotensi menyebabkan keterlambatan penyelesaian proyek, peningkatan *backlog* pengadaan, serta terganggunya jadwal pembangunan maupun pemeliharaan infrastruktur ketenagalistrikan.

Meskipun hasil penelitian menunjukkan bahwa skenario konservatif memperoleh nilai *Total Weighted Score* tertinggi, hal tersebut tidak berarti bahwa skenario konservatif merupakan satu-satunya pendekatan yang paling tepat untuk seluruh kondisi pengadaan. Ketiga skenario sebaiknya dipandang sebagai alternatif kebijakan yang dapat dipilih sesuai karakteristik kebutuhan PT PLN (Persero). Skenario konservatif lebih sesuai diterapkan pada pengadaan strategis transformator tenaga, paket dengan nilai investasi tinggi, atau kondisi ketika jumlah penyedia yang memiliki rekam jejak baik masih terbatas sehingga pengendalian risiko menjadi prioritas utama. Sebaliknya, skenario moderat dapat digunakan ketika PLN memiliki tujuan jangka menengah untuk meningkatkan kompetensi penyedia melalui distribusi order yang lebih merata, sedangkan skenario agresif lebih relevan pada kondisi pasar yang kompetitif dengan jumlah penyedia berkinerja baik yang relatif banyak sehingga manfaat diversifikasi dapat diperoleh tanpa meningkatkan risiko secara signifikan.

Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa pemilihan skenario alokasi tidak hanya ditentukan oleh besarnya nilai *Total Weighted Score*, tetapi juga perlu mempertimbangkan karakteristik risiko pengadaan, tingkat kematangan penyedia, serta tujuan strategis organisasi. Dalam konteks penelitian ini, skenario konservatif menjadi pilihan paling sesuai karena menghasilkan nilai TWS tertinggi sekaligus mampu memberikan keseimbangan terbaik antara kontinuitas pasokan, kualitas penyedia, dan pengendalian risiko operasional pada pengadaan transformator tenaga PT PLN (Persero).

Selain mempertimbangkan nilai *Total Weighted Score* (TWS), rekomendasi skenario alokasi dalam penelitian ini juga divalidasi melalui analisis sensitivitas untuk mengevaluasi kestabilan hasil terhadap perubahan parameter model. Hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa sebagian penyedia mempertahankan klasifikasi tier yang sama pada berbagai skenario pengujian, sedangkan beberapa penyedia mengalami perubahan klasifikasi akibat perubahan bobot maupun nilai *threshold*. Temuan tersebut menunjukkan bahwa tingkat *robustness* rekomendasi berbeda antar penyedia sehingga hasil analisis sensitivitas tidak hanya digunakan untuk mengevaluasi kestabilan model, tetapi juga menjadi dasar dalam menentukan tingkat keyakinan terhadap rekomendasi alokasi order. Penyedia dengan klasifikasi yang konsisten dapat diprioritaskan dalam pengambilan keputusan, sedangkan penyedia yang sensitif terhadap perubahan parameter tetap dapat dipertimbangkan dengan menerapkan strategi mitigasi risiko, seperti pemantauan kinerja yang lebih intensif atau penyesuaian proporsi alokasi order. Secara keseluruhan, hasil analisis sensitivitas mendukung bahwa skenario konservatif merupakan alternatif yang paling stabil dan menghasilkan nilai TWS tertinggi dalam penelitian ini.

Berdasarkan keseluruhan pembahasan, integrasi *machine learning* dengan model *rule based Supplier Selection and Order Allocation* (SSOA) menunjukkan bahwa informasi kinerja historis penyedia dapat dimanfaatkan tidak hanya untuk meningkatkan akurasi proses seleksi, tetapi juga untuk mendukung keputusan alokasi order yang mempertimbangkan kapasitas, risiko, dan stabilitas kinerja penyedia. Validasi melalui analisis sensitivitas menunjukkan bahwa rekomendasi yang dihasilkan relatif stabil meskipun terdapat beberapa penyedia yang

mengalami perubahan klasifikasi pada skenario tertentu. Temuan ini menunjukkan bahwa pendekatan yang diusulkan dapat menjadi alternatif pendukung keputusan (*decision support*) bagi PT PLN (Persero) dalam meningkatkan kualitas pengambilan keputusan pengadaan transformator tenaga.

Meskipun rekomendasi skenario konservatif didukung oleh hasil analisis sensitivitas yang menunjukkan tingkat robustness yang memadai, interpretasi terhadap hasil penelitian tetap perlu mempertimbangkan keterbatasan dataset yang digunakan. Penelitian ini menggunakan 119 observasi historis yang pada distribusi awal memiliki jumlah kelas High Performer yang sangat terbatas sehingga berpotensi memengaruhi kemampuan model dalam mempelajari karakteristik kelas tersebut. Oleh karena itu, kemampuan generalisasi model di luar konteks pengadaan transformator tenaga PT PLN (Persero) perlu diinterpretasikan secara hati-hati. Untuk meminimalkan risiko tersebut, penelitian ini menerapkan *Repeated Stratified K-Fold Cross Validation*, optimasi *hyperparameter* menggunakan *GridSearchCV*, serta regularisasi pada algoritma berbasis *ensemble* sehingga estimasi performa model menjadi lebih stabil dan tidak bergantung pada satu pembagian data (*data split*) tertentu. Konsistensi hasil evaluasi pada berbagai iterasi validasi menunjukkan bahwa performa model relatif stabil sehingga layak digunakan sebagai dasar klasifikasi penyedia dan integrasinya ke dalam model rule based SSOA pada konteks pengadaan transformator tenaga di PT PLN (Persero). Meskipun demikian, pengujian menggunakan *dataset* dengan jumlah observasi yang lebih besar, periode pengamatan yang lebih panjang, maupun jenis material pengadaan lainnya tetap diperlukan untuk menguji konsistensi hasil dan meningkatkan kemampuan generalisasi model.

Komparasi Rekomendasi SSOA dan Rencana Pengadaan Trafo PLN Tahun 2025

Untuk menilai relevansi praktis dari kerangka *Supplier Selection and Order Allocation* (SSOA) berbasis *machine learning* yang dikembangkan, hasil rekomendasi penelitian ini dibandingkan secara langsung dengan rencana pengadaan aktual PT PLN (Persero) Tahun 2025 sebagaimana tercantum dalam dokumen Rencana Kebutuhan Satuan (RKS). Perbandingan ini mencakup dua dimensi utama, yaitu jumlah penyedia yang direkomendasikan pada setiap varian transformator tenaga serta implikasinya terhadap efisiensi pengadaan dan mitigasi risiko backlog. Adapun perbandingan antara jumlah maksimum penyedia yang ditetapkan dalam dokumen RKS PT PLN (Persero) Tahun 2025 dengan jumlah penyedia layak yang dihasilkan oleh model SSOA berbasis *machine learning* pada setiap paket pengadaan transformator tenaga disajikan pada tabel berikut.

Tabel 7 Komparasi Rekomendasi SSOA-ML dengan RKS PLN 2025

Paket	Varian	Est. Volume (Unit)	Maks. DPT	Rekomendasi SSOA-ML	Penyedia Layak
1	500/168 kV 167 MVA AIS	5	2	PT Bambang Djaja, PT XD Sakti Indonesia	2
2	150/66 kV 100 MVA GIS	1	1	PT Unelec Indonesia (UNINDO)	1
3	150/66 kV 60 MVA AIS	1	1	Data historis tidak memadai	–
4	150/22 kV 60 MVA AIS	44	5	PT Elsewedy, PT UNINDO, PT XD Sakti	3
5	150/22 kV 60 MVA GIS	3	2	PT Sintra Sinarindo, PT UNINDO	2

Berdasarkan tabel tersebut, perbedaan paling substantif antara rekomendasi SSOA berbasis *machine learning* dengan rencana pengadaan aktual PLN terdapat pada Paket 4 (150/22 kV 60 MVA AIS), yaitu varian dengan estimasi volume terbesar sebesar 44 unit dan memberikan kontribusi paling dominan terhadap total kebutuhan pengadaan transformator tenaga tahun 2025. Dokumen RKS PLN menetapkan maksimum lima penyedia dengan pola alokasi bertingkat sebesar 30%, 25%, 20%, 15%, dan 10%, sedangkan model SSOA berbasis *machine learning* hanya merekomendasikan tiga penyedia yang memenuhi kriteria kelayakan, yaitu PT Elsewedy Electric Indonesia, PT Unelec Indonesia (UNINDO), dan PT XD Sakti Indonesia.

Perbedaan tersebut muncul karena kedua pendekatan menggunakan dasar pengambilan keputusan yang berbeda. Pendekatan pengadaan aktual PLN berorientasi pada pemenuhan ketentuan administrasi, persyaratan teknis, serta prinsip kompetisi antarpemenuhan yang memungkinkan lebih banyak penyedia ditetapkan sebagai pemenang. Sebaliknya, model SSOA berbasis *machine learning* melakukan seleksi berdasarkan rekam jejak kinerja historis penyedia yang dipelajari dari data, meliputi aspek ketepatan waktu penyelesaian kontrak, kualitas pelaksanaan pekerjaan, kapasitas produksi, riwayat penalti, serta indikator kinerja lainnya. Dengan demikian, meskipun suatu penyedia memenuhi persyaratan administratif, penyedia tersebut belum tentu direkomendasikan oleh model apabila memiliki pola kinerja historis yang kurang memadai. Oleh karena itu, pengurangan jumlah penyedia dari lima menjadi tiga bukan disebabkan oleh keterbatasan jumlah penyedia dalam DPT, tetapi merupakan hasil proses seleksi berbasis bukti empiris (*evidence-based selection*) yang bertujuan meminimalkan risiko operasional selama pelaksanaan kontrak.

Implikasi praktis dari perbedaan tersebut cukup signifikan terhadap strategi pengadaan PLN. Konsentrasi alokasi kepada penyedia yang memiliki rekam jejak kinerja lebih baik berpotensi meningkatkan tingkat keberhasilan penyelesaian kontrak, mengurangi risiko keterlambatan pengiriman transformator, serta menekan kemungkinan terjadinya backlog pengadaan. Selain itu, jumlah penyedia yang lebih sedikit pada paket dengan volume besar juga berpotensi menyederhanakan proses koordinasi kontrak, monitoring pelaksanaan pekerjaan, dan evaluasi kinerja penyedia. Namun demikian, pendekatan ini juga memiliki konsekuensi berupa meningkatnya ketergantungan terhadap penyedia yang direkomendasikan sehingga PLN tetap perlu menjaga keseimbangan antara pengendalian risiko dan keberlanjutan pengembangan kapasitas penyedia lainnya.

Untuk Paket 1 (500/168 kV 167 MVA AIS) dengan estimasi volume lima unit dan maksimum dua pemenang, model SSOA merekomendasikan PT Bambang Djaja dan PT XD Sakti Indonesia sebagai dua penyedia yang layak. Hasil tersebut menunjukkan adanya konvergensi antara rekomendasi model dan kebijakan pengadaan PLN dalam hal jumlah penyedia. Perbedaannya terletak pada dasar penetapan penyedia, di mana model memberikan justifikasi tambahan berupa evaluasi kinerja historis sehingga keputusan pemilihan penyedia tidak hanya didasarkan pada pemenuhan persyaratan administratif, tetapi juga mempertimbangkan probabilitas keberhasilan pelaksanaan kontrak berdasarkan pengalaman sebelumnya.

Pada Paket 2 (150/66 kV 100 MVA GIS) dan Paket 3 (150/66 kV 60 MVA AIS), baik dokumen RKS maupun model SSOA menunjukkan kondisi *single source*. Untuk Paket 2, model hanya mengidentifikasi PT Unelec Indonesia (UNINDO) sebagai penyedia yang

memenuhi kriteria, sedangkan pada Paket 3 tidak terdapat penyedia yang dapat direkomendasikan berdasarkan data historis periode 2023–2025. Temuan ini menunjukkan bahwa permasalahan utama pada kedua paket bukan terletak pada metode seleksi penyedia, melainkan pada keterbatasan struktur pasar penyedia transformator tenaga. Kondisi tersebut mengindikasikan tingginya risiko konsentrasi pasokan (*supply concentration risk*), sehingga PLN perlu mempertimbangkan strategi jangka panjang berupa pembinaan penyedia baru, perluasan basis DPT, atau peningkatan kompetensi penyedia eksisting agar ketergantungan terhadap satu penyedia dapat dikurangi.

Pada Paket 5 (150/22 kV 60 MVA GIS), model SSOA merekomendasikan PT Sintra Sinarindo Elektrik dan PT Unelec Indonesia (UNINDO), sesuai dengan batas maksimum dua penyedia dalam dokumen RKS. Meskipun demikian, hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa PT Sintra Sinarindo Elektrik belum sepenuhnya robust terhadap perubahan parameter pada Level 1. Temuan ini mengindikasikan bahwa rekomendasi model tidak hanya berfungsi sebagai dasar pemilihan penyedia, tetapi juga memberikan informasi mengenai tingkat kestabilan keputusan sehingga PLN dapat menerapkan pengawasan kontrak yang lebih intensif terhadap penyedia yang memiliki tingkat sensitivitas lebih tinggi.

Tabel 8 Komparasi Porsi Alokasi Historis PLN vs Rekomendasi SSOA Konservatif

Varian	Volume (Unit)	Porsi Historis PLN (Urutan %)	Skenario SSOA Konservatif	Jumlah Penyedia Layak	Keterangan
500/168 kV 167 MVA AIS	5	60% / 40%	Proporsional Tier	2	Konvergen
150/66 kV 100 MVA GIS	1	100%	100% (single source)	1	Konvergen – risiko tinggi
150/66 kV 60 MVA AIS	1	100%	–	–	Data tidak memadai
150/22 kV 60 MVA AIS	44	30% / 25% / 20% / 15% / 10%	Konsentrasi ke 3 penyedia terbaik	3	Divergen – efisiensi meningkat
150/22 kV 60 MVA GIS	3	60% / 40%	Proporsional Tier	2	Konvergen

Perbandingan pola alokasi historis PLN dengan rekomendasi skenario konservatif pada Tabel 8 menunjukkan bahwa sebagian besar varian menghasilkan rekomendasi yang konvergen, sedangkan perbedaan paling nyata kembali terjadi pada Paket 4. Pada pendekatan historis, order didistribusikan kepada lima penyedia dengan proporsi bertingkat, sedangkan skenario konservatif memusatkan alokasi kepada tiga penyedia terbaik berdasarkan hasil klasifikasi *machine learning*. Perbedaan ini menunjukkan bahwa model yang diusulkan lebih menekankan kualitas kinerja penyedia dibandingkan pemerataan distribusi order.

Skenario konservatif dinilai lebih sesuai dibandingkan pola historis PLN karena karakteristik pengadaan transformator tenaga memiliki tingkat risiko yang tinggi terhadap keberlangsungan sistem transmisi. Dalam kondisi tersebut, kegagalan satu penyedia dalam memenuhi kontrak dapat berdampak pada tertundanya pembangunan infrastruktur, meningkatnya *backlog* pengadaan, serta terganggunya keandalan sistem ketenagalistrikan. Oleh karena itu, memusatkan proporsi order kepada penyedia dengan probabilitas keberhasilan yang lebih tinggi merupakan strategi yang lebih rasional dibandingkan mendistribusikan order

secara lebih merata kepada penyedia yang memiliki tingkat kinerja historis lebih rendah. Dengan kata lain, rekomendasi konservatif memberikan keseimbangan yang lebih baik antara efisiensi operasional dan pengendalian risiko, meskipun konsekuensinya adalah tingkat diversifikasi penyedia menjadi lebih rendah.

Dari perspektif implikasi terhadap *backlog* pengadaan, data realisasi tahun 2023–2025 menunjukkan bahwa tingkat pemenuhan kebutuhan menurun dari 100% pada tahun 2023 dan 2024 menjadi hanya 75,9% pada tahun 2025, sehingga menghasilkan *backlog* sebanyak 13 unit. Temuan ini menunjukkan bahwa pendekatan seleksi penyedia yang hanya berorientasi pada pemenuhan persyaratan administratif belum tentu mampu menghasilkan tingkat pemenuhan kebutuhan yang optimal. Melalui integrasi *machine learning* dan SSOA, penelitian ini menawarkan mekanisme seleksi yang lebih berbasis bukti empiris dengan memprioritaskan penyedia yang memiliki probabilitas keberhasilan lebih tinggi. Dengan demikian, konsentrasi alokasi pada penyedia yang memiliki rekam jejak terbaik diharapkan mampu meningkatkan tingkat pemenuhan kontrak dan menurunkan potensi *backlog* pada periode pengadaan berikutnya.

Secara keseluruhan, hasil komparasi menunjukkan bahwa perbedaan utama antara rekomendasi SSOA berbasis *machine learning* dan pendekatan historis PLN bukan terletak pada jumlah penyedia yang dipilih, melainkan pada paradigma pengambilan keputusannya. Pendekatan konvensional lebih menitikberatkan pada aspek administratif, teknis, dan kompetisi antar penyedia, sedangkan model yang diusulkan mengintegrasikan informasi kinerja historis penyedia sebagai dasar optimasi alokasi order. Pendekatan ini menghasilkan keputusan pengadaan yang lebih objektif, transparan, dan berbasis data, sehingga berpotensi meningkatkan efektivitas pengadaan transformator tenaga melalui pengurangan risiko keterlambatan, penurunan *backlog*, serta peningkatan keandalan rantai pasok PT PLN (Persero).

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengintegrasikan model *tree-based machine learning* dengan kerangka *Supplier Selection and Order Allocation* (SSOA) menggunakan 18 variabel dari data historis pengadaan PT PLN (Persero) periode 2023–2025. Di antara algoritma yang diuji (Decision Tree, Random Forest, dan XGBoost), Random Forest terpilih sebagai model terbaik dengan nilai *macro AUC* sebesar 0,9882 (*excellent classification*) karena keunggulannya dalam menangani data multi-kelas yang tidak seimbang. Integrasi klasifikasi Random Forest ke dalam sistem *rule-based* SSOA berhasil memetakan enam penyedia ke dalam tiga tier prioritas, di mana hanya kategori *High* dan *Medium Performer* yang direkomendasikan sebagai kandidat layak. Pendekatan ini terbukti menghasilkan keputusan pengadaan yang lebih objektif dan transparan dibandingkan orientasi harga konvensional. Untuk pengembangan ke depan, disarankan adanya standarisasi pencatatan indikator kinerja (seperti TKDN, keterlambatan, dan NCR) serta pengujian algoritma lain (LightGBM/CatBoost) dengan volume data yang lebih besar guna mewujudkan *data-driven procurement* yang lebih adaptif.

REFERENSI

Adli, K. (2022). *Perancangan key risk indicator sebagai sistem peringatan dini dalam usaha mitigasi risiko (Studi kasus: PT PLN (Persero) Unit Penyaluran dan Pusat Pengatur*

- Beban Sistem (UP3B) Kalimantan Barat).*
- Alhidayatullah, S. M. (2024). *Manajemen rantai pasok modern: Strategi, desain, dan kinerja dalam era dinamis*. PT Kimhsafi Alung Cipta.
- Azizah, N. Q. El. (2025). *Optimasi pemilihan supplier dan penentuan ukuran pemesanan pada pengadaan kemasan multi-item dan multi-periode*.
- Ghorabae, M. K. (2023). Sustainable supplier selection and order allocation using an integrated ROG-based type-2 fuzzy decision-making approach. *Mathematics*, 11(9), Article 2014. <https://doi.org/10.3390/math11092014>
- Habiby, J. S. (2026). *Sistem tenaga listrik*. In *Pengantar teknik elektro* (p. 105).
- Hayati, E. N., Jauhari, W. A., Damayanti, R. W., & Rosyidi, C. N. (2025). An integrated analytics model for supplier selection and order allocation with machine learning and multi-criteria optimization. *Decision Analytics Journal*, 16, Article 100599. <https://doi.org/10.1016/J.DAJOUR.2025.100599>
- Maulana, I. (2024). *LKP Ilham Maulana 218120009: Pemahaman dan perawatan pada sistem jaringan distribusi di PT PLN (Persero) ULP Medan Sunggal*.
- Meridiana, O., Julita, V., & Zefriyenni. (2026). *Keseimbangan dinamis: Memahami mekanisme harga di pasar modern*. Fahmi Karya.
- Polo-Triana, S., Gutierrez, J. C., & Leon-Becerra, J. (2024). Integration of machine learning in the supply chain for decision making: A systematic literature review. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 17(2), 344–372. <https://doi.org/10.3926/jiem.6403>
- Putra, I. A. A., Takdir, R. A., Makmur, I. M., Wibowo, A. H., Dukalang, S. S. S. A., Gusti, S., & Munansar, I. (2026). *Transportasi logistik dan rantai pasok*. Arsy Media.
- Putri, M. A. (2024). Peran manajemen risiko dalam logistik pada manajemen rantai pasokan: Dwelling time di pelabuhan. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 10(24), 63–71.
- Rahardian, K., Riastuti, R., & Zakiyuddin, A. (2024). Prediksi sisa umur layan dan analisa risiko pada power transformer menggunakan pendekatan distribusi Weibull dan risk priority number. *MALCOM: Indonesian Journal of Machine Learning and Computer Science*, 4(1). <https://doi.org/10.57152/malcom.v4i1.1068>
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., & Tarantola, S. (2008). *Global sensitivity analysis: The primer*. John Wiley & Sons.
- Santosa, B. (2023). *Data mining untuk business analytics dengan Python*. Penebar Media Pustaka.
- Saragih, D. P. A. (2024). *LKP Devin Prayoga Agustira Saragih 218120037: Optimalisasi pemeliharaan transmisi tegangan rendah dalam upaya mengurangi gangguan listrik PT PLN Nusantara Power UP Belawan*.
- Shirkouhi, S. N., Jalalat, S. M., Sangari, M. S., Sepehri, A., & Vandchali, H. R. (2023). A robust-fuzzy multi-objective optimization approach for a supplier selection and order allocation problem: Improving sustainability under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 186, Article 109757. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109757>
- Shohibah, E. S. (2022). *Laporan kuliah kerja magang (KKM) bagian pengadaan barang dan jasa PT PLN UP3 Mojokerto*.
- Siti, M. R. (2025). *Analisis kinerja dan mitigasi risiko rantai pasok sayuran hidroponik di Kota Bandar Lampung (Studi kasus pada Pusat Pelatihan Pertanian dan Perdesaan Swadaya (P4S) Jaya Anggara Farm)* [Skripsi, Universitas Lampung].

- Togatorop, A. T. (2024). *LKP Andreas Tiopan Togatorop 208120007: Sistem pemeliharaan gardu distribusi PT PLN (Persero)*.
- Wanti, N. A. S. (2023). *Laporan kuliah kerja magang (KKM): Analisis e-procurement terhadap prosedur pengadaan barang dan jasa PT PLN UP3 Mojokerto*.