

Perancangan Penempatan Material Cadang di PLN Transmisi Jawa Bagian Barat Melalui Pendekatan *Clustering Analysis*

Abu Muslim Al Ashfahany^{1,2}, Mar'atus Sholihah¹, Erwin Widodo¹

¹ Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Jl. Raya ITS, Keputih, Kec. Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur 60111

Email: abumuslimalashfa@gmail.com, sholihah@ie.its.ac.id, erwin@ie.its.ac.id

² PLN UIT JBB

Jl. Ehave, Gandul, Kec. Cinere, Kota Depok, Jawa Barat 16514

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan menganalisis perencanaan dan penempatan material cadang yang optimal pada PLN Transmisi UIT JBB dengan pendekatan Clustering Analysis. Permasalahan yang diangkat meliputi tingginya biaya persediaan, lamanya lead time distribusi, serta ketergantungan pada pengadaan emergency akibat sistem penempatan material cadang yang belum terstruktur. Metode penelitian menggunakan K-Means Clustering, dengan Elbow Method untuk menentukan jumlah cluster optimal berdasarkan karakteristik aset transmisi, pola kebutuhan material, dan cakupan wilayah operasional setiap UPT. Data yang digunakan merupakan data sekunder PLN UIT JBB, mencakup jumlah gardu induk, kapasitas trafo, panjang saluran transmisi, serta penggunaan material cadang periode 2023–2025. Pengolahan data dilakukan melalui tahap data selection, normalisasi Min-Max Scaling, perhitungan Euclidean Distance, Within-Cluster Sum of Squares (WCSS), dan proses clustering. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jumlah cluster optimal adalah $k = 3$. Cluster pertama terdiri atas UPT Cilegon dan Cikupa dengan kebutuhan material tinggi; cluster kedua terdiri atas Gandul dan Pulogadung dengan karakteristik aset menengah; sedangkan cluster ketiga terdiri atas Cawang dan Durikosambi dengan kapasitas aset besar dan kepadatan gardu induk tinggi. Strategi penempatan material berbasis clustering melalui centralized warehouse, decentralized warehouse, dan hybrid/support hub mampu meningkatkan efisiensi distribusi material cadang. Model ini menghasilkan efisiensi biaya inventory dan distribusi sebesar 18,7%, pengurangan emergency procurement sebesar 22,4%, serta penurunan lead time sebesar 16,3%. Temuan ini mendukung peningkatan keandalan pemenuhan material, percepatan respons gangguan, pengurangan risiko keterlambatan operasional, penguatan koordinasi antar-UPT, dan optimalisasi supply chain transmisi PLN UIT JBB secara berkelanjutan pada sistem kelistrikan regional yang kompleks dinamis..

Kata kunci: Material Cadangan, *K-Means Clustering*, *Metode Elbow*, Optimasi Persediaan, Kritikalitas Aset, Transmisi PLN.

ABSTRACT

This study aims to analyze the optimal planning and placement of spare materials at PLN Transmisi UIT JBB using the Clustering Analysis approach. The problems raised include high inventory costs, long distribution lead times, and dependence on emergency procurement due to an unstructured spare material placement system. The research method uses K-Means Clustering, with the Elbow Method to determine the optimal number of clusters based on the characteristics of transmission assets, material requirement patterns, and operational area coverage of each UPT. The data used are secondary data from PLN UIT JBB, including the number of substations, transformer capacity, transmission line length, and spare material usage for the period 2023–2025. Data processing is carried out through data selection, Min-Max Scaling normalization, Euclidean Distance calculation, Within-Cluster Sum of Squares (WCSS), and clustering processes. The results show that the optimal number of clusters is $k = 3$. The first cluster consists of UPT Cilegon and Cikupa with high material requirements; the second cluster consists of Gandul and Pulogadung with medium asset characteristics; The third cluster consists of Cawang and Durikosambi, each with a large asset capacity and high substation density. A clustering-based material placement strategy using a centralized warehouse, decentralized warehouse, and hybrid/support hub improved the efficiency of spare material distribution. This model resulted in an 18.7% increase in inventory and distribution costs, a 22.4% reduction in emergency procurement, and a 16.3% reduction in lead time. These findings support increased reliability of material fulfillment, accelerated disruption response, reduced risk of operational delays, strengthened coordination between technical implementation units (UPTs), and sustained optimization of the PLN UIT JBB transmission supply chain in a complex and dynamic regional electricity system.

Keywords: Spare Material Planning, *K-Means Clustering*, *Elbow Method*, Inventory Optimization, Asset Criticality, PLN Transmission.

Pendahuluan

Keandalan sistem transmisi tenaga listrik merupakan salah satu elemen fundamental dalam menjaga kontinuitas penyaluran energi listrik, khususnya pada wilayah strategis seperti Jawa Bagian Barat (JBB) yang memiliki tingkat konsumsi energi tinggi dan kepadatan infrastruktur kelistrikan yang kompleks. Ketersediaan material cadang menjadi faktor penentu dalam menjamin waktu pemulihan gangguan (*restoration time*) dan keberlangsungan operasi sistem secara keseluruhan. Namun demikian, hingga saat ini pengadaan dan pengelolaan material cadang di lingkungan PLN Transmisi JBB masih menghadapi sejumlah tantangan yang berdampak langsung terhadap efektivitas operasional dan efisiensi pembiayaan perusahaan, diantaranya kesenjangan antara pengadaan normal dan pengadaan darurat (*emergency procurement*) dan penerapan model *decentralized inventory* yang saat ini digunakan.

Pendekatan klasifikasi tradisional seperti ABC Analysis memiliki keterbatasan karena hanya mempertimbangkan nilai konsumsi tahunan dan belum mampu merepresentasikan hubungan multidimensi antara karakteristik aset, risiko operasional, serta variabilitas kebutuhan material. Seiring meningkatnya kompleksitas sistem utilitas dan jaringan transmisi, berbagai penelitian mulai mengadopsi pendekatan data-driven berbasis *clustering* untuk menghasilkan segmentasi yang lebih representatif dan mendukung pengambilan keputusan inventori yang lebih efektif [1][2]

Pendekatan berbasis *ensemble learning* dan *clustering* dapat meningkatkan akurasi segmentasi kebutuhan suku cadang dalam rantai pasok after-market [3]. Selain itu, pengembangan metodologi *data-driven clustering* untuk mengevaluasi konfigurasi jaringan pasok suku cadang secara periodik tidak hanya membantu klasifikasi item, tetapi juga mendukung pengambilan keputusan strategis terkait distribusi stok dan konfigurasi jaringan logistik [4]. Integrasi analitik data dalam manajemen persediaan suku cadang menjadi bagian penting dari transformasi digital supply chain [5].

Penelitian mengenai klasifikasi persediaan suku cadang umumnya masih terpeka pada aspek segmentasi item, akurasi peramalan, dan optimasi rantai pasok makro. Penelitian ini hadir untuk mengatasi keterbatasan tersebut melalui pendekatan baru yang mengintegrasikan segmentasi aset berbasis *clustering* dengan penempatan material secara strategis pada jaringan utilitas *multi-eselon* yang tersebar luas. Keunggulan lain dari penelitian ini adalah keberhasilannya dalam mengakomodasi karakteristik spesifik sistem transmisi listrik yang jarang dibahas sebelumnya, khususnya terkait integrasi multiparameter seperti kritikalitas aset, aksesibilitas geografis, dan keandalan jaringan.

Pendekatan *clustering analysis* menjadi relevan untuk diterapkan dalam konteks PLN Transmisi JBB. *Clustering* merupakan metode unsupervised learning yang mengelompokkan objek berdasarkan kemiripan karakteristik multidimensi, tanpa asumsi awal mengenai struktur kelompok. Dalam penelitian ini, variabel yang digunakan meliputi historis permintaan, tingkat kritikalitas, aksesibilitas geografis, pola gangguan, serta karakteristik lokasi aset. Dengan membentuk kluster yang merepresentasikan kesamaan kebutuhan dan risiko, perusahaan dapat merumuskan strategi penempatan material cadang yang lebih tepat sasaran dan berbasis bukti. *Clustering* memberikan dasar analitis untuk mengevaluasi efektivitas konfigurasi penyimpanan antara *model centralized inventory* dan *decentralized inventory*. Wilayah dengan intensitas gangguan tinggi dan aksesibilitas rendah, misalnya, mungkin memerlukan penyimpanan lokal yang lebih kuat, sementara wilayah dengan pola gangguan stabil dapat mengandalkan dukungan regional. Dengan demikian, *clustering* berfungsi sebagai mekanisme segmentasi strategis dalam mendukung perencanaan material cadang.

Kontribusi penelitian ini terletak pada pengembangan kerangka kerja berbasis data (*data-driven framework*) yang mengintegrasikan *Clustering Analysis* dengan strategi penempatan material cadang pada jaringan transmisi tenaga listrik multi-unit. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya berfokus pada klasifikasi persediaan, peramalan permintaan, atau konfigurasi rantai pasok secara umum, penelitian ini secara langsung menghubungkan hasil pengelompokan karakteristik aset dan kebutuhan material dengan keputusan penempatan persediaan melalui pendekatan *centralized warehouse*, *decentralized warehouse*, dan *hybrid support hub*. Selain memberikan kontribusi teoritis dalam pengembangan pendekatan segmentasi persediaan multidimensional pada sistem utilitas, penelitian ini juga menunjukkan kontribusi praktis berupa peningkatan efisiensi biaya inventory dan distribusi sebesar 18,7%, penurunan *emergency procurement* sebesar 22,4%, serta pengurangan lead time distribusi material sebesar 16,3%. Dengan demikian, penelitian ini memperluas penerapan Clustering Analysis dari fungsi klasifikasi menjadi instrumen pengambilan keputusan strategis dalam pengelolaan material cadang pada sistem transmisi tenaga listrik.

Penelitian ini menjadi penting untuk mengembangkan perencanaan dan penempatan material cadang lebih efisien, responsif, dan terstruktur. Melalui penerapan *clustering analysis*, penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar segmentasi kebutuhan yang lebih representatif, meminimalkan pemborosan anggaran, meningkatkan koordinasi antar-unit, serta memperkuat keandalan sistem transmisi PLN Transmisi JBB secara keseluruhan.

Metode Penelitian

Penelitian ini menerapkan pendekatan yang sistematis dan berbasis data untuk mengatasi berbagai tantangan dalam manajemen inventaris suku cadang di PLN Transmisi. Melalui enam tahapan terstruktur, penelitian diawali dengan perumusan masalah yang berfokus pada dua pertanyaan utama, yaitu mengenai pemanfaatan analisis kluster dalam menentukan strategi perencanaan serta penempatan material cadangan yang optimal, dan pencarian model penempatan yang paling tepat untuk

PLN Transmisi Jawa Barat guna menekan biaya inventaris, meningkatkan keandalan pemenuhan material, serta meminimalkan ketergantungan pada pengadaan darurat.

Langkah berikutnya adalah melakukan tinjauan pustaka yang menyeluruh terhadap studi-studi terdahulu mengenai metode klaster dan manajemen inventaris untuk memahami teknik mutakhir beserta penerapannya, sehingga diperoleh wawasan dalam memilih algoritme dan metodologi yang tepat [6]. Setelah itu, dilakukan pengumpulan data sekunder yang relevan dari sistem internal PLN, laporan Unit Pelaksana Transmisi, dan dokumen perencanaan korporat, yang mencakup data historis pengadaan reguler maupun darurat, lokasi aset transmisi di Jawa Barat, ketersediaan material di gudang, pola gangguan, waktu tunggu pengadaan, serta rincian biaya penyimpanan, transportasi, dan investasi.

Data yang telah terkumpul kemudian masuk ke tahap pemrosesan dan pembersihan data melalui beberapa rangkaian proses, meliputi penghapusan data duplikat, penanganan nilai yang hilang, normalisasi variabel, hingga penyiapan kandidat variabel analisis klaster seperti jarak antarunit, frekuensi gangguan, kategori material, waktu tunggu, dan tingkat kekritisan material demi menjamin kualitas data yang memadai sesuai rekomendasi pra-pemrosesan data suku cadang [3]. Tahap selanjutnya merupakan inti dari metodologi penelitian, yaitu analisis klaster, yang diawali dengan mengidentifikasi variabel yang memengaruhi pengelompokan lokasi penyimpanan material cadangan, memilih metode klaster yang tepat seperti K-Means, Hierarchical Clustering, atau DBSCAN, dan menentukan jumlah klaster optimal memakai metode seperti Elbow Method, Silhouette Coefficient, atau Indeks Davies-Bouldin. Hasil pengelompokan tersebut kemudian diinterpretasikan berdasarkan karakteristik geografis, pola gangguan, serta distribusi beban, yang pada akhirnya digunakan untuk mengidentifikasi lokasi-lokasi pusat paling representatif dalam penempatan material. Sebagai tahapan akhir, dilakukan perumusan rekomendasi strategis mengenai lokasi klaster penyimpanan yang optimal, jumlah alokasi material, perbandingan efektivitas model tersentralisasi dan terdesentralisasi, serta implikasinya terhadap keandalan sistem transmisi dan efisiensi investasi, di mana seluruh rekomendasi ini diselaraskan dengan persyaratan regulasi, kebijakan Rencana Kerja dan Anggaran Perusahaan (RKAP), dan kemampuan logistik perusahaan [4]

Hasil Dan Pembahasan

Identifikasi material cadang

Tahap identifikasi material cadangan diawali dengan pengumpulan seluruh data historis penggunaan material dari setiap unit pelaksana, yang mencakup kebutuhan terencana maupun darurat dalam kurun waktu tertentu. Data tersebut diperoleh dari catatan pemeliharaan, laporan penggantian peralatan, rekaman gangguan sistem, serta dokumen permintaan material yang diajukan oleh masing-masing unit pelaksana [7]. Setelah data berhasil dihimpun, material tersebut dikelompokkan berdasarkan jenis guna menentukan frekuensi penggunaan setiap item pada masing-masing unit pelaksana.

Tahap berikutnya meliputi pengklasifikasian material berdasarkan nama, spesifikasi, fungsi, dan lokasi pemanfaatan. Dalam penelitian ini, komponen yang diidentifikasi meliputi Inter Bus Transformer (IBT), transformator daya (power transformer), sakelar pemisah (PMS), sakelar pemutus tenaga (PMT), transformator arus (current transformer/CT), transformator tegangan/capacitive voltage transformer (CVT), dan lightning arrester. Setiap komponen kemudian dianalisis berdasarkan fungsi teknisnya dalam sistem transmisi guna mengevaluasi dampak yang ditimbulkan terhadap kontinuitas penyaluran energi listrik apabila terjadi kegagalan fungsi atau kerusakan.

Tabel 1.Identifikasi material spare dan lokasinya

Name of Material	Years 2023-2025						Total Plan
	Plan						
	Cilegon	Cikupa	Durkos	Gandul	Cawang	Pulogadung	
IBT (unit)	0	0	0	0	0	3	3
Trafo Tenaga (unit)	2	2	3	6	5	5	23
Disconnecting Switch /PMS	79	62	14	13	3	46	217
Circuit Breaker/PMT	36	30	18	7	7	11	109
Current Transformer/CT	117	52	23	9	13	28	242
Potential Transformer/CVT	38	16	14	2	14	18	102
Lightning Arrester	6	11	7	3	10	14	51

Tabel 2. Identifikasi material emergency dan lokasinya

Name of Material	Years 2023-2025						Total Emergency
	Emergency						
	Cilegon	Cikupa	Durkos	Gandul	Cawang	Pulogadung	
IBT (unit)	3	0	0	2	0	0	5
Trafo Tenaga (unit)	0	0	1	0	0	1	2
Disconnecting Switch /PMS	0	0	0	0	0	0	0
Circuit Breaker/PMT	10	2	1	0	1	0	14

Current Transformer/CT	16	0	1	2	0	2	21
Potential Transformer/CVT	4	2	4	1	0	5	16
Lightning Arrester	1	1	2	3	3	0	10

Seleksi Data

Pada tahap seleksi data, proses identifikasi dan penapisan dilakukan terhadap seluruh data aset yang diperoleh dari PT PLN (Persero) Unit Induk Transmisi Jawa Bagian Barat (UIT JBB). Tahapan ini bertujuan untuk menentukan data yang relevan dan sesuai untuk diproses menggunakan metode kluster. Tidak semua data yang terdapat dalam dokumen sumber digunakan, karena beberapa variabel dinilai tidak berkaitan dengan tujuan utama penelitian, yaitu perancangan penempatan material cadangan berdasarkan kemiripan karakteristik aset pada setiap Unit Pelaksana Transmisi (UPT). Proses seleksi data dilakukan dengan memilih data yang relevan dari dokumen aset PLN UIT JBB untuk digunakan dalam analisis kluster. Hanya variabel yang berkaitan langsung dengan skala aset, kondisi operasional, dan kebutuhan material cadangan yang disertakan, sedangkan variabel yang tidak relevan dieksklusi dari analisis.

Tabel 3. Hubungan antara besar aset UPT dengan kebutuhan material cadang

No	UPT	Total GI	Trafo (Unit)	Kapasitas Trafo (MVA)	Total Saluran Udara	Saluran Kabel (kms)	Material Dominan 2023–2025	Total Plan	Total Emergenc	Keterangan
1	Cawang	29	80	6120	229,61	198,72	CT, CVT, Trafo Tenaga	52	3	Fokus gardu induk perkotaan dan kabel
2	Cikupa	22	61	5420	684,65	37,31	PMS, CT, PMT	173	5	Jaringan luas, kebutuhan switching tinggi
3	Cilegon	31	35	4210	925,02	10,15	PMS, CT, PMT, CVT	278	34	Kawasan industri, kebutuhan tertinggi
4	Durikosambi	35	90	8040	358,35	138,23	CT, PMT, Trafo	79	9	Kapasitas trafo terbesar
5	Gandul	24	69	7660	615,68	84,14	Trafo, Arrester, CT	40	8	Sistem interkoneksi penting
6	Pulogadung	34	79	7380	308,01	157,53	PMS, CT, Arrester	125	8	Kawasan industri dan urban

Tabel gabungan di atas menunjukkan hubungan antara besar aset UPT dengan kebutuhan material cadang. UPT dengan jaringan dan aktivitas tinggi seperti Cilegon dan Cikupa memiliki kebutuhan material paling besar, sedangkan unit dengan kapasitas trafo besar seperti Durikosambi dan Pulogadung membutuhkan fokus cadangan peralatan gardu induk dan transformator. Data ini selanjutnya digunakan untuk analisis clustering penempatan material cadang.

Normalisasi Data (Min Max Scaling)

Berdasarkan Tabel 2, data aset final yang terpilih dinormalisasi terlebih dahulu sebelum dilakukan proses pengklasteran. Normalisasi diterapkan untuk menstandarisasi rentang nilai antarvariabel guna mencegah variabel tertentu mendominasi proses perhitungan Jarak Euclidean (Euclidean Distance). Dalam penelitian ini, variabel seperti jumlah gardu induk (GI) dan transformator diukur dalam satuan puluhan, variabel kabel diukur dalam satuan ratusan, sedangkan kapasitas transformator (MVA) memiliki nilai numerik yang jauh lebih besar. Tanpa adanya normalisasi, variabel MVA akan mendominasi proses pengklasteran dan berpotensi menghasilkan kluster yang bias.

Normalisasi data sangat diperlukan karena setiap variabel memiliki satuan pengukuran yang berbeda. Sebagai contoh, jumlah gardu induk diukur dalam satuan unit, kapasitas transformator diukur dalam satuan MVA, dan panjang saluran transmisi diukur dalam satuan kilometer. Jika data tidak dinormalisasi, variabel dengan skala numerik yang lebih besar akan memberikan pengaruh yang lebih dominan pada proses pengklasteran. Normalisasi umumnya dilakukan dengan metode Min-Max, yang mentransformasikan seluruh nilai data ke dalam rentang antara 0 dan 1. Karena variabel-variabel dalam penelitian ini memiliki skala yang berbeda, formula normalisasi Min-Max diterapkan sebagai berikut:

$$X' = (X - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}) \tag{1}$$

Sebagai contoh variabel Gardu Induk UPT Cawang:

Min GI = 22
Max GI = 35

$$X' = \frac{29 - 22}{35 - 22} = 0.538$$

Sehingga normalisasi data untuk Gardu Induk UPT Cawang adalah 0,538.

Tabel 4. Normalisasi data (Min-Max Scaling)

UPT	Total GI	Trafo (Unit)	Kapasitas (MVA)	Saluran Udara (kms)	Kabel (kms)
Cawang	0,538	0,818	0,499	0,000	1,000
Cikupa	0,000	0,473	0,316	0,654	0,144
Cilegon	0,692	0,000	0,000	1,000	0,000
Durikosambi	1,000	1,000	1,000	0,185	0,679
Gandul	0,154	0,618	0,901	0,555	0,392
Pulogadung	0,923	0,800	0,828	0,113	0,782

Hasil normalisasi menunjukkan bahwa nilai mendekati 0 merepresentasikan nilai terendah pada suatu variabel, sedangkan nilai mendekati 1 menunjukkan nilai tertinggi. Pada variabel GI, Cikupa memiliki nilai normalisasi terendah sebesar 0,000 yang menunjukkan jumlah gardu induk paling sedikit, sedangkan Durikosambi memiliki nilai tertinggi sebesar 1,000 yang menunjukkan jumlah gardu induk paling besar. Pada variabel Trafo dan MVA, Durikosambi juga memiliki nilai tertinggi yang menunjukkan kapasitas dan jumlah trafo terbesar dibanding UPT lainnya. Sebaliknya, Cilegon memiliki nilai MVA terendah sehingga menunjukkan kapasitas sistem yang relatif lebih kecil.

Setelah data dinormalisasi, langkah berikutnya adalah menghitung jarak Euclidean Distance terhadap centroid. Adapun tabel dibawah centroid awal (rata-rata):

Tabel 5. Centroid Awal (Rata-rata)

Variabel	Nilai
Total GI	0,551
Trafo (Unit)	0,618
Kapasitas (MVA)	0,591
Saluran Udara (kms)	0,418
Kabel (kms)	0,500

Jarak menggunakan *Euclidean Distance*:

$$d = \sqrt{(x_1 - c_1)^2 + (x_2 - c_2)^2 + \dots + (x_n - c_n)^2} \tag{2}$$

Dimana:

d = jarak tiap data ke centroid

x x_1, x_2, \dots, x_n = x material

c c_1, c_2, \dots, c_n = rata-rata material

Berdasarkan data Unit dan nilai rata-rata sebagai centroid awal:

Tabel 6. Hasil Euclidean Distance

UPT	Distance
Cawang	0,688
Cikupa	0,763
Cilegon	1,157
Durikosambi	0,775
Gandul	0,533
Pulogadung	0,633

Hasil perhitungan Euclidean Distance menunjukkan tingkat kedekatan karakteristik masing-masing UPT terhadap centroid awal (rata-rata data). Nilai Euclidean Distance yang semakin kecil menunjukkan bahwa karakteristik suatu UPT semakin mendekati rata-rata keseluruhan data, sedangkan nilai yang semakin besar menunjukkan bahwa karakteristik UPT tersebut semakin berbeda dari rata-rata. Berdasarkan hasil perhitungan, Gandul memiliki nilai Euclidean Distance terkecil

sebesar 0,533 sehingga dapat diinterpretasikan sebagai UPT yang memiliki karakteristik aset paling mendekati kondisi rata-rata sistem transmisi. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah gardu induk, kapasitas MVA, panjang saluran udara, serta kebutuhan kabel pada Gandul relatif seimbang dibandingkan UPT lainnya.

Sebaliknya, Cilegon memiliki nilai Euclidean Distance terbesar sebesar 1,158 yang menunjukkan bahwa karakteristik asetnya paling berbeda dibanding UPT lain. Nilai tersebut dipengaruhi oleh tingginya panjang saluran udara transmisi (SUTT) namun kapasitas MVA dan jumlah trafo yang relatif lebih rendah. Perbedaan karakteristik tersebut menyebabkan posisi Cilegon berada cukup jauh dari centroid rata-rata. Sementara itu, Durikosambi dan Pulogadung memiliki nilai distance yang cukup tinggi karena memiliki kapasitas MVA dan jumlah trafo yang besar dibandingkan rata-rata sistem.

Tahapan berikutnya adalah menentukan rentang jumlah cluster (k) yang akan diuji. Pada penelitian ini, karena jumlah objek hanya enam UPT, maka nilai k dapat diuji dari k = 1 sampai k = 5. Setiap nilai k akan dicoba satu per satu menggunakan algoritma K-Means untuk membentuk kelompok data berdasarkan kemiripan karakteristik. Setelah proses perhitungan Euclidean Distance dilakukan, langkah berikutnya adalah menghitung nilai Within Cluster Sum of Squares (WCSS). WCSS digunakan untuk mengukur tingkat homogenitas data dalam suatu cluster. Semakin kecil nilai WCSS, maka data dalam cluster semakin dekat dengan centroid dan cluster yang terbentuk semakin baik. Pada penelitian ini, perhitungan WCSS dilakukan untuk beberapa jumlah cluster (k) guna menentukan jumlah cluster optimal menggunakan metode Elbow Method.

Kemudian untuk menghitung nilai Within Sum of Squares (WCSS) untuk setiap nilai k. Nilai WCSS menunjukkan total variasi jarak antar data terhadap centroid dalam cluster yang sama. Semakin kecil nilai WCSS, berarti data dalam cluster semakin homogen atau memiliki kemiripan tinggi. Oleh karena itu, setiap hasil clustering dari k = 1 sampai k = 5 akan menghasilkan nilai WCSS yang berbeda. Perhitungan centroid masing-masing cluster lalu hitung:

$$WCSS = \sum(d)^2 \tag{3}$$

Dimana:

WCSS = jumlah kuadrat jarak seluruh data terhadap centroid cluster.

d = Euclidean Distance tiap data terhadap centroid cluster

d² = squared distance

WCSS (Within Cluster Sum of Squares) dihitung dari jumlah squared distance tiap data terhadap centroid cluster masing-masing. Karena seluruh data masih dalam satu cluster maka dihitung seluruhnya. Total WCSS k = 1 yaitu 3.681

Tabel 7. Hasil WSCC untuk k = 1

UPT	Distance	d ²
Cawang	0,688	0,474
Cikupa	0,763	0,583
Cilegon	1,157	1,339
Durikosambi	0,775	0,601
Gandul	0,533	0,285
Pulogadung	0,633	0,400

Dasar penentuan k =2 untuk 2 cluster berdasarkan FGD (Focus Group Discussion) dan pendekatan kapasitas. Kemudian diklasifikasikan yaitu:

- Durikosambi, Gandul, Pulogadung dengan kapasitas besar
- Cawang, Cikupa, Cilegon dengan kapasitas lebih kecil

Maka lebih dekat centroid yang sama, sehingga masuk cluster yang sama. Total WCSS k = 2 yaitu 2.548

Tabel 8. Hasil WSCC untuk k = 2

d ² Cluster 1		d ² Cluster 2	
Unit	d ²	Unit	d ²
Gandul	0.44831	Cawang	0.90521
Pulogadung	0.11626	Cikupa	0.23867
Durikosambi	0.15412	Cilegon	0.68516
WCSS Cluster 1	0.71869	WCSS Cluster 2	1.82904

Pada penelitian ini centroid awal dipilih dari UPT Cilegon, Gandul, dan Durikosambi karena ketiganya mewakili karakteristik berbeda, yaitu unit dengan jaringan luas, unit menengah, dan unit dengan kapasitas aset besar. Total WSCC untuk ke = 3 yaitu 1,277

Tabel 9. Hasil WSCC untuk k = 3

Cluster	WCSS
C1 Cilegon, Cikupa	0.471
C2 Gandul, Pulogadung	0.489

Tabel 10. Visualisasi Level Cluster PLN UIT JBB

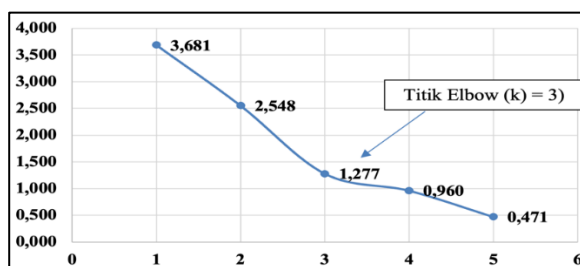
Cluster	UPT	Karakter Utama	Strategi gudang	Peta sebaran cluster UPT PLN UIT JBB
C1 (HIGH)	Cilegon, Cikupa	Saluran transmisi sangat panjang Kebutuhan material tinggi Lead time distribusi tinggi Resiko gangguan besar Frekuensi pengiriman tinggi	<i>Decentralize d Warehouse</i>	
C2 (MEDIUM)	Gandul, Pulogadung	Aset dan demand sedang Lokasi strategis Akses distribusi baik Berfungsi sebagai support area	<i>Hybrid/support hub</i>	
C3 (CORE)	Cawang, Durikosambi	Kapasitas trafo tersebut GI padat Pusat distribusi sistem Infrastruktur gudang besar Lead Time rendah	<i>Centralized Warehouse</i>	

Implikasi Strategi Logistik Berbasis Klaster

Hasil clustering menunjukkan bahwa setiap klaster memerlukan strategi penempatan persediaan yang berbeda karena adanya variasi karakteristik operasional serta pola kebutuhan material cadang. Cluster 1 (Cilegon–Cikupa) memiliki tingkat konsumsi material cadang yang tinggi dan cakupan jaringan transmisi yang luas, sehingga strategi gudang terdesentralisasi lebih sesuai untuk menjamin ketersediaan material secara cepat dan meminimalkan risiko gangguan layanan. Cluster 2 (Gandul–Pulogadung) merepresentasikan profil aset dan kebutuhan material pada tingkat menengah, sehingga penerapan strategi hybrid support hub dapat menjadi alternatif yang efektif untuk menyeimbangkan ketersediaan persediaan dan efisiensi penyimpanan. Sementara itu, Cluster 3 (Cawang–Durikosambi) terdiri atas aset transmisi berkapasitas tinggi yang terkonsentrasi pada wilayah tertentu. Oleh karena itu, strategi gudang terpusat dinilai lebih sesuai karena mampu memberikan manfaat berupa skala ekonomi, peningkatan visibilitas persediaan, serta pengurangan duplikasi stok. Temuan ini menunjukkan bahwa pendekatan clustering dapat mendukung perumusan strategi logistik yang terdiferensiasi sesuai karakteristik masing-masing klaster, dibandingkan menerapkan satu kebijakan persediaan yang seragam untuk seluruh unit operasional.

Temuan ini sejalan dengan literatur mengenai manajemen persediaan multi-eselon (*multi-echelon inventory management*), yang menyatakan bahwa keputusan penempatan persediaan harus diselaraskan dengan karakteristik permintaan, tingkat kritikalitas aset, dan kebutuhan tingkat layanan (*service level*). Temuan serupa juga dilaporkan oleh Sheikh-Zadeh dkk. (2020) dan Cantini dkk. (2024), yang menekankan bahwa penerapan kebijakan persediaan yang terdiferensiasi dapat meningkatkan responsivitas logistik sekaligus mengurangi redundansi persediaan[1]-[4]. Penelitian ini memperluas perspektif tersebut dengan menunjukkan bagaimana segmentasi aset berbasis klasterisasi dapat diterjemahkan menjadi strategi penempatan material cadang yang praktis dan efektif dalam lingkungan jaringan transmisi tenaga listrik.

Hasil perhitungan WCSS pada rentang jumlah klaster $k = 1$ sampai $k = 5$ dirangkum untuk mengidentifikasi pola penurunan WCSS. Hubungan antara jumlah klaster dan nilai WCSS divisualisasikan menggunakan metode *Elbow* melalui *Elbow Graph*, dengan jumlah klaster pada sumbu horizontal dan nilai WCSS pada sumbu vertikal. Grafik tersebut memperlihatkan kecenderungan penurunan nilai WCSS seiring dengan peningkatan jumlah klaster, yang menunjukkan bahwa variasi data di dalam masing-masing klaster semakin homogen [8].

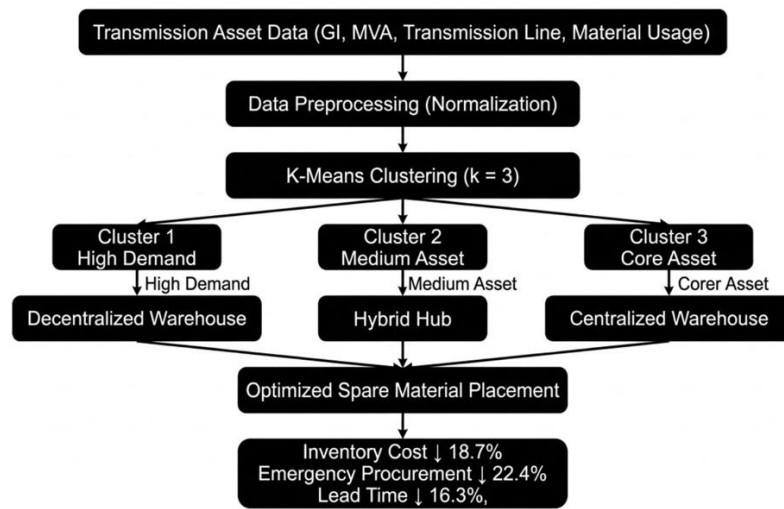


Gambar 1. Elbow method

Berdasarkan hasil analisis kluster menggunakan metode K-Means dengan jumlah kluster (k) = 3 pada penelitian ini, tingkat kluster yang terbentuk dapat dikelompokkan ke dalam tiga kategori yang merepresentasikan karakteristik wilayah operasional serta kebutuhan material cadangan.

Tabel 11. Perhitungan Elbow Method

No	Jumlah Cluster (k)	Nilai WCSS	Penurunan WCSS	Keterangan
1	1	3.681	-	Seluruh data dalam 1 cluster
2	2	2.548	1.133	Penurunan signifikan
3	3	1.277	1.271	Penurunan sangat signifikan
4	4	0.960	0.317	Mulai melandai
5	5	0.471	0.489	Penurunan kecil



Gambar 2. Framework Integrasi Clustering dan Penempatan Material

Simpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan Clustering Analysis merupakan pendekatan berbasis data yang efektif dalam merancang strategi penempatan material cadang di PLN Unit Induk Transmisi Jawa Bagian Barat (PLN UIT JBB). Dengan mengintegrasikan variabel operasional, geografis, dan persediaan, seperti riwayat permintaan, tingkat material kritis, frekuensi gangguan, waktu tunggu (lead time), aksesibilitas, serta karakteristik aset, penelitian ini berhasil mengelompokkan unit transmisi berdasarkan kesamaan kebutuhan material cadang. Hasil pengelompokan tersebut menghasilkan kerangka segmentasi yang lebih representatif dibandingkan metode klasifikasi konvensional serta mendukung optimalisasi perencanaan dan penempatan material cadang melalui peningkatan visibilitas persediaan, pengurangan ketergantungan terhadap pengadaan darurat, dan peningkatan respons terhadap gangguan operasional. Implementasi *Elbow Method* dan algoritma *K-Means* juga berhasil mengidentifikasi struktur kluster yang optimal, sehingga mendukung evaluasi strategi persediaan terpusat (*centralized inventory*) maupun terdesentralisasi (*decentralized inventory*) dalam meningkatkan efisiensi persediaan tanpa mengurangi keandalan sistem transmisi. Selain memberikan kontribusi praktis bagi PLN UIT JBB dalam menentukan lokasi penyimpanan yang optimal dan memprioritaskan material cadang kritis, penelitian ini juga memperkaya literatur mengenai pengelolaan material cadang multidimensional pada sistem transmisi tenaga listrik.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Analisis yang dilakukan bergantung pada data internal sekunder PLN UIT JBB dan hanya berfokus pada variabel operasional yang tersedia, tanpa mempertimbangkan aspek ekonomi, lingkungan, maupun sosial secara lebih luas. Selain itu, model klusterisasi dikembangkan berdasarkan kondisi operasional historis sehingga belum sepenuhnya mengakomodasi dinamika sistem secara waktu nyata (*real-time*) maupun perubahan kebijakan di masa mendatang. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan pendekatan *predictive analytics*, peramalan berbasis *machine learning*, serta metode klusterisasi alternatif seperti DBSCAN, Fuzzy C-Means, dan *Gaussian Mixture Models* guna menghasilkan model yang lebih adaptif dan akurat. Integrasi model optimasi, seperti *Linear Programming* maupun pendekatan berbasis simulasi, juga direkomendasikan untuk mendukung sistem pengambilan keputusan yang lebih komprehensif dalam pengelolaan material cadang pada jaringan transmisi multiechelon. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *Clustering Analysis* dapat dimanfaatkan

tidak hanya sebagai metode pengelompokan data secara statistik, tetapi juga sebagai instrumen strategis dalam mendukung peningkatan efektivitas pengelolaan persediaan, penguatan koordinasi antarunit kerja, peningkatan keandalan operasional, serta optimalisasi manajemen material cadang di lingkungan PLN Unit Induk Transmisi Jawa Bagian Barat (PLN UIT JBB).

Daftar Pustaka

- [1] A. Sheikh-Zadeh, M. A. Scott, and F. Enayaty-Ahangar, "The role of prescriptive data and non-linear dimension-reduction methods in spare part classification," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 175, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.cie.2022.108912.
- [2] S. Bhalla, E. Alfnes, H. H. Hvolby, and F. Sgarbossa, "Advances in spare parts classification and forecasting for inventory control: A literature review," in *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier B.V., 2021, pp. 982–987. doi: 10.1016/j.ifacol.2021.08.118.
- [3] C. F. Chien, C. C. Ku, and Y. Y. Lu, "Ensemble learning for demand forecast of After-Market spare parts to empower data-driven value chain and an empirical study," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 185, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.cie.2023.109670.
- [4] A. Cantini, M. Peron, F. De Carlo, and F. Sgarbossa, "A data-driven methodology for the periodic review of spare parts supply chain configurations," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 62, no. 5, pp. 1818–1845, 2024, doi: 10.1080/00207543.2023.2201939.
- [5] A. Shokri, S. M. H. Toliyat, S. Hu, and D. Skoumpopoulou, "Integrating spare part inventory management and predictive maintenance as a digital supply chain solution," *Journal of Modelling in Management*, vol. 20, no. 3, pp. 1003–1029, Mar. 2025, doi: 10.1108/JM2-05-2024-0131.
- [6] M. Arani, S. Abdolmaleki, M. Maleki, M. Momenitabar, and X. Liu, "A Simulation-Optimization Technique for Service Level Analysis in Conjunction with Reorder Point Estimation and Lead-Time Consideration: A Case Study in Sea Port," 2021, pp. 839–858. doi: 10.1007/978-3-030-69984-0_61.
- [7] H. Irawan, M. I. Fawzi, and S. Hidayat, "Integration of K-Means Clustering and Elbow Method for Mapping *Baccaurea* spp. Distribution to Support Agroindustrial Development in West Sulawesi," *Jurnal Teknik Informatika (JUTIF)*, vol. 6, no. 2, 2025, doi: 10.52436/1.jutif.6.2.4671.
- [8] A. Mushawir, A. Faeda Insani, A. Adiaksa, Z. Zainuddin, and S. Viridi, "Spare Part Selection for Storage in PLN Suku Cadang Warehouse Using Clustering Analysis."