



# Panduan Pusat Kendali Masa Depan

Disiapkan untuk Pusat Kendali Perusahaan Listrik Negara (PLN) Sulawesi

*Adrian Kelly, Eric Hatter  
Lembaga Penelitian Tenaga Listrik*

*Seong Lok Choi, Lina Ramirez  
Laboratorium Energi Terbarukan Nasional*

*Rob Hardison*

Februari 2024



## PEMBERITAHUAN

Pekerjaan ini sebagian dipersiapkan oleh Laboratorium Energi Terbarukan Nasional yang dioperasikan oleh Alliance for Sustainable Energy, LLC, untuk Departemen Energi (DOE) AS berdasarkan Kontrak No. DE-AC36-08GO28308. Laboratorium Energi Terbarukan Nasional berfungsi sebagai sekretariat untuk Konsorsium Transformasi Sistem Tenaga Global. Pandangan yang diungkapkan dalam laporan ini tidak otomatis mewakili pandangan DOE atau Pemerintah AS atau lembaganya yang mana pun.

## Pernyataan

Panduan Pusat Kendali Masa Depan (CCOTF) ini dikembangkan oleh Konsorsium Transformasi Sistem Tenaga Global (G-PST), yang dipimpin oleh Laboratorium Energi Terbarukan Nasional (NREL) bekerja sama dengan Lembaga Penelitian Tenaga Listrik (EPRI). Proses pengembangan panduan ini dibuat oleh EPRI dan berfungsi sebagai kerangka kerja untuk pendekatan serupa untuk operasi sistem tenaga listrik di seluruh dunia. Panduan ini dimungkinkan dengan pendanaan dari Departemen Luar Negeri AS kepada G-PST. G-PST adalah prakarsa yang didorong oleh pakar dan praktisi yang melibatkan operator sistem tenaga listrik utama, lembaga penelitian dan pendidikan, pemerintah, dunia usaha, dan pemangku kepentingan untuk mengatasi hambatan umum di seluruh dunia dalam memungkinkan transisi energi ramah lingkungan pada skala yang belum pernah terjadi sebelumnya. Lihat [www.globalpst.org](http://www.globalpst.org) untuk perincian lebih lanjut.

G-PST mengucapkan terima kasih kepada staf *Perusahaan Listrik Negara* (PLN) atas dukungan yang luas dalam pengumpulan data dan memberikan perincian serta wawasan mengenai operasi sistem ketenagalistrikan di Sulawesi. Khususnya Bapak Dhany Barus, Bapak Jarot Setiawan, dan Bapak Meiji, Bapak Furqan Idris, Bapak Hasanuddin, antara lain, yang memberikan dukungan sangat bermanfaat, tinjauan, dan masukan selama proses berlangsung. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Barbara O'Neill dan Mahendra Patel atas dukungan manajemen dan teknisnya, serta Liz Breazeale, Chris Schwing, dan Isabel McCan atas dukungan editorial dan desain.

## Daftar Akronim

AGC  
CCOTF  
DRC  
EMS  
G-PST  
IEC CIM  
IPP  
IT  
OCM  
ORC  
OT  
PLN  
PMU  
RES  
SCADA  
WAMS  
WAMPAC

Kendali Pembangkitan Otomatis  
Pusat Kendali Masa Depan  
Pusat Pemulihan Bencana  
Sistem Manajemen Energi  
Konsorsium Transformasi Sistem Tenaga Global  
Model Informasi Umum Komisi Elektroteknik Internasional  
Produsen Listrik Independen  
Teknologi Informasi  
Model Kemampuan Operasional  
Pusat Kesiapan Operasi  
Teknologi Operasional  
*Perusahaan Listrik Negara*  
Unit Pengukuran Fasor  
Sumber Energi Terbarukan  
Kendali Pengawasan dan Akuisisi Data  
Sistem Pemantauan Area Luas  
Pemantauan, Perlindungan, dan Pengendalian Area Luas

# Daftar Isi

<b>1</b>	<b>Pendahuluan .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Konteks Sistem Sulawesi.....</b>	<b>2</b>
2.1	Fokus pada tahun 2023–2030.....	2
2.2	Permintaan pada Masa Mendatang.....	3
2.3	Generasi Masa Depan.....	5
2.4	Jaringan Transmisi Masa Depan .....	7
2.5	Ringkasan .....	10
<b>3</b>	<b>Pernyataan Visi dan Misi PLN.....</b>	<b>11</b>
3.1	Visi PLN.....	11
3.2	Misi PLN .....	11
<b>4</b>	<b>Kerangka Desain CCOTF .....</b>	<b>12</b>
4.1	Pendekatan Tradisional pada Desain Pusat Kendali .....	12
4.2	Visi G-PST CCOTF .....	12
4.3	OCM Lembaga Penelitian Tenaga Listrik.....	15
<b>5</b>	<b>Data Operasional CCOTF .....</b>	<b>17</b>
5.1	Pendorong Perubahan dan Visi CCOTF .....	17
5.2	Nilai Pengembangan dan Peningkatan Manajemen Data Pusat Kontrol.....	17
5.3	Panduan untuk Data Operasional CCOTF .....	21
<b>6</b>	<b>CCOTF OT .....</b>	<b>22</b>
6.1	Pendorong Perubahan dan Visi CCOTF untuk OT .....	22
6.2	Nilai Pengembangan Pusat Kendali OT .....	24
<b>7</b>	<b>Faktor Manusia dan Pendukung Keputusan CCOTF .....</b>	<b>30</b>
7.1	Pendorong Perubahan dan Visi CCOTF untuk OT .....	30
7.2	Nilai Pengembangan dan Peningkatan Faktor Manusia Operator dan Pendukung Keputusan ...	31
7.3	Panduan untuk Faktor Manusia dan Pendukung Keputusan .....	33
<b>8</b>	<b>Panduan Fasilitas dan Peralatan CCOTF .....</b>	<b>34</b>
8.1	Pendorong Perubahan dan Visi CCOTF .....	34
8.2	Nilai Pengembangan dan Peningkatan Fasilitas dan Peralatan Pusat Kendali .....	34
8.3	Panduan untuk Fasilitas dan Peralatan CCOTF .....	36
<b>9</b>	<b>Pertimbangan Masa Depan .....</b>	<b>37</b>

## Daftar Gambar

Gambar 1. Pertumbuhan permintaan PLN Sulawesi tahun 2023 hingga 2030 .....	3
Gambar 2. Pembangkitan tambahan Sulawesi, 2023–2030 .....	5
Gambar 3. Tingkat pertumbuhan Sulawesi .....	7
Gambar 4. Jalur transmisi Sulawesi, 2023 vs. pertumbuhan pada masa depan .....	10
Gambar 5. Visualisasi grafis visi untuk CCOTF .....	14
Gambar 6. Kerangka untuk CCOTF .....	16
Gambar 7. Visi CCOTF $\infty$ Visi PLN .....	17
Gambar 8. Visi untuk model data .....	18
Gambar 9. Memanfaatkan sistem pengelolaan model terpusat .....	19
Gambar 10. Pendorong utama perubahan .....	22
Gambar 11. Visi CCOTF $\infty$ Visi PLN .....	24
Gambar 12. Pendorong utama perubahan .....	30
Gambar 13. Visi CCOTF $\infty$ Visi PLN .....	31
Gambar 14. Tangga keputusan Rasmussen dengan tiga mode pengambilan keputusan operator .....	32
Gambar 15. Pendorong utama perubahan .....	34
Gambar 16. Visi CROF $\infty$ Visi PLN .....	35

## Daftar Tabel

Tabel 1. Panduan untuk Data Operasional CCOTF .....	21
Tabel 2. Tabel Alat OT yang Diperlukan Untuk Memantau, Menilai, dan Mengendalikan Sistem PLN Masa Depan ...	26
Tabel 3. Faktor Manusia dan Pendukung Keputusan .....	33
Tabel 4. Fasilitas dan Peralatan .....	36
Tabel 5. Pertimbangan Masa Depan untuk Meningkatkan Sistem Sulawesi .....	37

# 1 Pendahuluan

Pusat kendali sistem tenaga mempunyai staf yang bertugas merencanakan dan mengelola operasi jaringan listrik secara real-time. Sistem tenaga listrik di seluruh dunia sedang mengalami perubahan transformatif dalam bauran sumber daya pembangkitan, karakteristik dan skala beban penggunaan akhir, serta arsitektur jaringan listrik yang mengubah karakteristik dinamis semua jaringan listrik secara drastis. Teknologi, metode, dan alat canggih akan diperlukan di pusat kendali untuk mempertahankan operasi yang efektif. Mengingat persyaratan keandalan yang tinggi, regulasi, dan laju inovasi sebelumnya, pusat kendali transmisi secara umum berkembang perlahan seiring waktu, selaras dengan lambatnya perkembangan jaringan transmisi. Namun, perubahan sangat cepat yang terjadi pada sistem transmisi akhir-akhir ini menimbulkan risiko dan tantangan sistem yang tidak pernah diperkirakan sebelumnya. Laju perubahan ini diperkirakan akan terus berlanjut dengan meningkatnya elektrifikasi penggunaan akhir, peralihan ke sumber daya berbasis inverter dan sumber daya terdistribusi, serta kemajuan dalam kemampuan merespons permintaan. Dalam sistem saling terhubung yang lemah dengan penetrasi energi terbarukan yang tinggi dan/atau pertumbuhan permintaan yang cepat, alat pemantauan dan pengendalian usang tidak memadai untuk menilai dan mengatasi risiko yang kemungkinan besar akan berdampak pada sistem.

Meskipun terdapat banyak solusi menarik dan berguna untuk risiko dan tantangan yang ada saat ini, sifat kebutuhan sistem tenaga listrik yang terus berkembang memerlukan pengembangan dan penerapan solusi baru secara berkelanjutan. Penelitian dan pengembangan yang sedang berlangsung dilakukan untuk membantu menghadirkan pendekatan baru terhadap data, aplikasi, proses, dan pertimbangan faktor manusia ke dalam lingkungan pusat kendali real-time.

Upaya pembuatan panduan umumnya berfungsi untuk menginformasikan perencanaan jangka panjang dan keputusan desain sistem dengan fokus pada fungsi pusat kendali yang diinginkan yang akan mendukung penyediaan listrik yang andal, aman, dan efisien. Untuk menjaga relevansi dalam sektor ketenagalistrikan yang berkembang pesat, panduan tidak berfokus pada persyaratan teknis tertentu, namun menjabarkan kemampuan fungsional umum yang harus dipertimbangkan dalam proses perencanaan.

Panduan ini dimaksudkan untuk digunakan oleh para pengambil keputusan di perusahaan penyedia listrik negara di Indonesia, PT Perusahaan Listrik Negara (PLN), baik untuk rancangan teknis jangka pendek maupun jangka panjang, serta perencanaan strategis dan pengadaan. Dokumen ini tidak dimaksudkan sebagai rencana implementasi atau tindakan yang harus diikuti oleh PLN, melainkan merupakan cara indikatif dan visioner dalam mempertimbangkan pendekatan optimal untuk memenuhi kebutuhan sistem tenaga listrik pada masa depan.

Sistem ketenagalistrikan PLN di Sulawesi akan segera mengalami perubahan pesat dengan adanya peningkatan dan perluasan jangka pendek yang akan menimbulkan risiko dan tantangan penting. Rencana sedang dibuat untuk menghubungkan sistem utara dan selatan dan mengimplementasikan kemampuan pemulihan bencana; peningkatan beban sangat cepat diperkirakan terjadi sebagai bagian dari peningkatan aktivitas pertambangan, dan sumber energi terbarukan (RES) di Sulawesi akan terus berkontribusi pada komitmen nasional terhadap bauran energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025. Peta jalan ini akan menyusun arah bagi implementasi struktur terbaik di kelasnya dan kemampuan fungsional terkait untuk Pusat Kendali Sulawesi Masa Depan (CCOTF). Ini adalah rencana ambisius dan visioner yang mendorong pusat kendali terkemuka di industri untuk operator sistem. Panduan ini mencakup seluruh aspek fungsionalitas pusat kendali, mulai dari data yang dipantau dan kebutuhan analisis hingga pertimbangan desain fasilitas.

## 2 Konteks Sistem Sulawesi

### 2.1 Fokus pada tahun 2023–2030

Sistem kelistrikan Sulawesi diperkirakan akan mengalami pertumbuhan signifikan dalam beberapa dekade mendatang. Berdasarkan pembaruan rencana transmisi tahun 2021–2030, diperkirakan sekitar USD \$1,6 miliar akan diinvestasikan dalam proyek infrastruktur transmisi. Hal ini diperlukan karena antisipasi pertumbuhan permintaan, yang memerlukan pertumbuhan pembangkitan yang proporsional. Sekitar USD \$981 juta telah direncanakan untuk 11 proyek dan pekerjaan konstruksi, yang direncanakan akan dimulai pada tahun 2020–21 dan selesai pada tahun 2026. Sisanya sebesar USD \$659 juta dialokasikan untuk 13 proyek, yang konstruksinya akan dimulai setelah tahun 2021.<sup>1</sup> Hal terpenting dalam peningkatan sistem Sulawesi adalah menghubungkan sistem utara dan selatan, mengimplementasikan kemampuan Pusat Pemulihan Bencana (DRC), dan memperluas kapasitas pembangkitan dan transmisi agar selaras dengan antisipasi pertumbuhan beban terkait pertambangan.

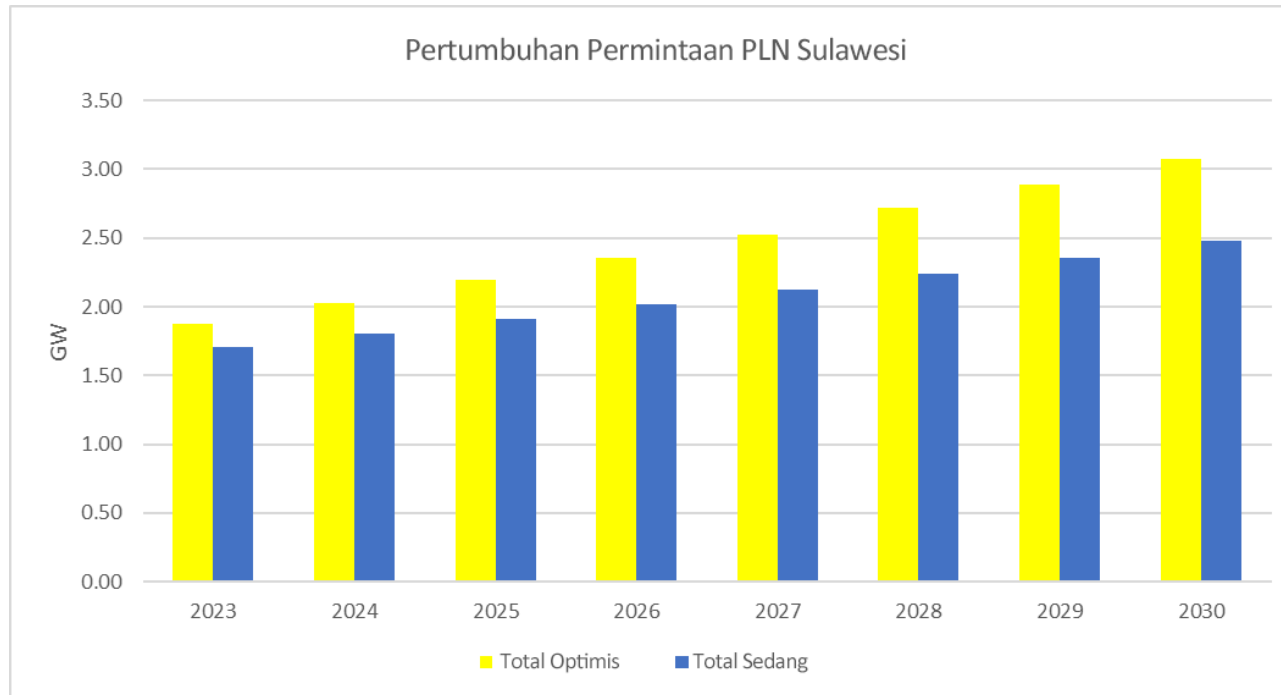
Bagian berikut menganalisis pertumbuhan permintaan sistem, pembangkitan, dan jaringan di Sulawesi selama dekade berikutnya, dengan mengacu pada kebutuhan pusat kendali.

---

<sup>1</sup> PLN, “Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL), 2021–2030 [Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik, 2021-2030].” Jakarta, Indonesia, 2021.



## 2.2 Permintaan pada Masa Depan



**Gambar 1. Pertumbuhan permintaan PLN Sulawesi tahun 2023 hingga 2030 dengan dua skenario pertumbuhan yang berbeda (sedang dan optimis)**

Sumber: RUPTL, 2021–2030

Berdasarkan rata-rata proyeksi pertumbuhan PLN yang sedang dan optimis pada tahun 2023–2030, permintaan puncak diperkirakan akan tumbuh dari 1,8 GW menjadi

2,8 GW atau peningkatan 55% dalam 7 tahun. Ini merupakan tingkat peningkatan permintaan yang signifikan dan memerlukan peningkatan kapasitas pembangkitan dan jaringan transmisi yang sepadan untuk menghubungkan pembangkitan baru dengan permintaan yang terus meningkat.

### ***Apa Artinya Bagi Pusat Operasi dan Kendali?***

- Peningkatan kemampuan prakiraan permintaan

- Peningkatan kemampuan prakiraan sumber daya energi terdistribusi
- Respons permintaan, pembangkit listrik variabel
- Pemanfaatan data meteran pintar.

Pertumbuhan permintaan akan memerlukan pembangkitan dan aset jaringan yang signifikan untuk menyeimbangkan sistem secara aman dan real-time. Diperlukan peningkatan kemampuan perkiraan yang dapat memperkirakan secara akurat penggunaan permintaan pada sistem secara real time dan dengan jangka waktu yang memadai. Prakiraan operasional tingkat lanjut saat ini umumnya menggunakan teknologi kecerdasan buatan. Prakiraan permintaan harus mencakup sumber daya energi terdistribusi seperti fotovoltaik surya yang berada di belakang meteran, yang akan berdampak pada permintaan. Semua ini memerlukan integrasi yang lebih mendalam pada operasi dan kemampuan transmisi dan distribusi.

Agregasi permintaan, terkadang digambarkan sebagai pembangkit listrik virtual, mungkin muncul sebagai entitas yang harus dipantau dan dikendalikan di pasar energi masa depan. Memiliki kemampuan untuk memantau, memutuskan, dan mengendalikan penggunaan pembangkit listrik virtual akan menjadi aspek penting dalam membuka fleksibilitas pada sistem masa depan dan sebagai cadangan.

Pada tahun-tahun mendatang, meteran pintar dapat dipasang guna memberikan data meteran real-time ke pusat kendali untuk digunakan dalam prakiraan dan pendistribusian pembangkit listrik virtual. Akan diperlukan koordinasi yang erat dengan operator sistem distribusi untuk mengaktifkan kemampuan ini.

## 2.3 Generasi Masa Depan



**Gambar 2. Pembangkit tambahan Sulawesi, 2023–2030**

Sumber: RUPTL, 2021–2030

Jaringan PLN Sulawesi diproyeksikan menyediakan tambahan 2,2 GW kapasitas pembangkit milik PLN dan produsen listrik independen (IPP) antara tahun 2023 dan 2030. Proyeksi ini nampaknya cukup untuk mencakup rata-rata skenario sedang dan optimis (pertumbuhan permintaan tambahan sebesar 1 GW) dan skenario optimis (pertumbuhan permintaan sebesar 1,2 GW) dengan cadangan dan ruang untuk kontingensi, simpanan, serta pembangunan berkelanjutan dan pertumbuhan permintaan. Pertumbuhan ini terbagi antara sektor PLN dan IPP, dengan 0,9 GW kapasitas baru milik PLN dan 1,3 GW kapasitas milik produsen listrik independen yang akan tersambung pada tahun-tahun mendatang.

Diperkirakan akan ada peningkatan koneksi energi terbarukan ke jaringan listrik Sulawesi pada tahun-tahun mendatang, dengan sekitar 400 MW berasal dari fotovoltaik tenaga angin dan surya. Secara global, rencana penggunaan fotovoltaik tenaga angin dan surya mengalami tren peningkatan dalam beberapa tahun terakhir karena penurunan biaya dan peningkatan ambisi migrasi iklim; tren ini mungkin berlanjut di Sulawesi dan harus dipertimbangkan ketika merencanakan kemampuan dan kesiapan pusat kendali masa depan. Energi terbarukan berbasis

cuaca (seperti fotovoltaik tenaga angin dan surya) yang terhubung ke sistem massal dalam skala besar akan memerlukan kemampuan untuk memprakirakan keluaran mendatang seakurat mungkin secara dini. Prakiraan energi terbarukan berbasis cuaca yang ditingkatkan juga harus mencakup kemampuan prakiraan cuaca yang ditingkatkan sehingga mencakup prakiraan berbagai kejadian besar.

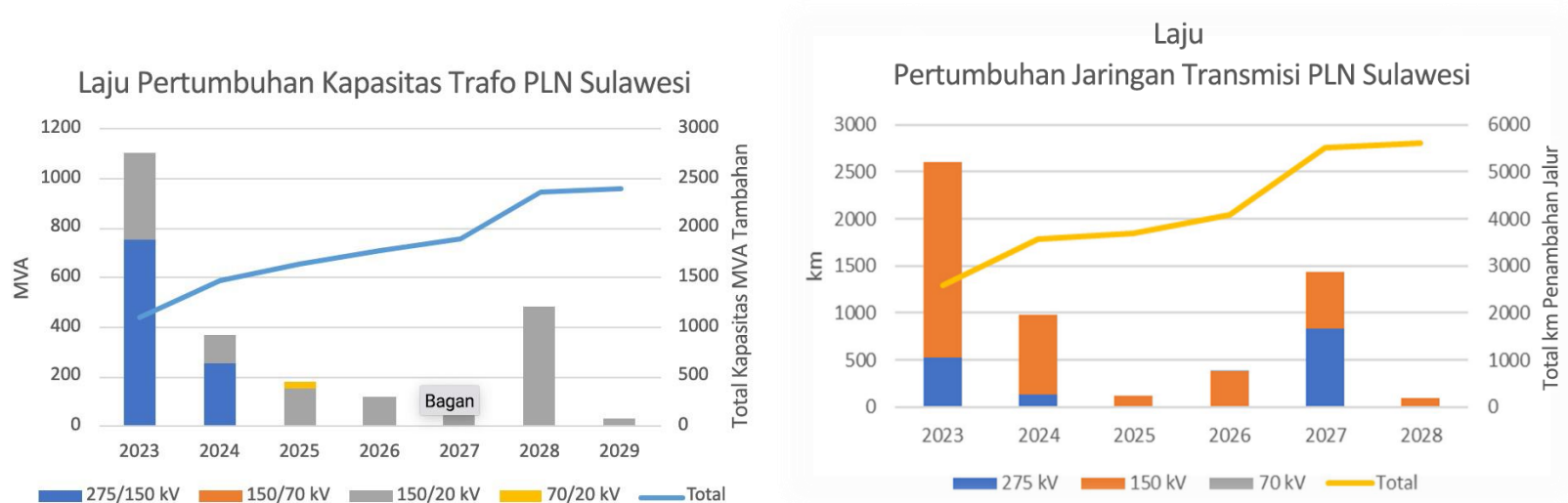
Dengan peningkatan kapasitas pembangkit listrik terbarukan yang bervariasi, akan ada lebih banyak tantangan terkait stabilitas sistem dinamis. Pada jaringan listrik di seluruh dunia yang telah menyertakan RES dengan sangat cepat dalam skala besar, terdapat tantangan baru terkait stabilitas frekuensi, stabilitas transien, dan stabilitas sinyal kecil (osilasi frekuensi). Perencanaan yang tepat dan integrasi perbaikan untuk memodelkan sistem pada rentang waktu yang dinamis, memantau dan menilai stabilitas sistem, dan mendukung pengambilan keputusan yang kuat seperti yang disoroti dalam panduan ini akan membantu mengatasi semua tantangan baru ini dan akan bermanfaat seiring dengan berkembangnya fungsi operasi.

Dengan peningkatan pesat dalam kapasitas pembangkit pada tahun-tahun mendatang, sumber daya harus disediakan, ditambahkan ke basis data teknologi operasional (OT), dan dimodelkan serta diverifikasi oleh manajer peralatan asli setelah disediakan. Hal ini memerlukan sumber daya manusia di pusat kendali dan ahli di bidangnya untuk memastikan model sumber daya selaras dan divalidasi.

### ***Apa Artinya Bagi Pusat Kendali?***

- Lebih banyak sumber daya terbarukan berbasis cuaca memerlukan kemampuan prakiraan.
- Masalah stabilitas dan keamanan sistem akan muncul dengan sumber daya pembangkit yang kurang konvensional.
- Sumber daya pembangkit tambahan akan disediakan dan diuji serta dimodelkan secara akurat dalam sistem OT.
- Tambahan pembangkit dari produsen listrik independen mungkin menimbulkan tantangan terkait persyaratan data dan komunikasi, validasi model, serta penyediaan dan pengujian.

## 2.4 Jaringan Transmisi Masa Depan



**Gambar 3. Tingkat pertumbuhan Sulawesi**

Sumber: RUPTL, 2021–2030

Selain pertumbuhan besar dalam permintaan dan kapasitas pembangkit, terdapat pula kebutuhan yang signifikan untuk meningkatkan kapasitas jaringan transmisi dalam hal jalur dan gardu induk baru. Pertumbuhan kapasitas trafo merupakan pengganti yang baik untuk pertumbuhan kapasitas jaringan (karena jumlah gardu induk mungkin tidak mencerminkan tingkat pertumbuhan sebenarnya). Statistik dan proyeksi PLN yang dipublikasikan menunjukkan pertumbuhan kumulatif kapasitas trafo sebesar 2,4 GVA antara tahun 2023 dan 2030. Hal ini kira-kira sesuai dengan pertumbuhan permintaan pada tahun-tahun berikutnya. Jaringan transmisi (jalur dan kabel) diproyeksikan bertambah 5.611 km antara tahun 2023 dan 2028. Proyeksi tersebut mencakup penambahan 2.598 km pada tahun 2023, di mana 2.078 km jalur 150 kV diperuntukkan bagi interkoneksi dua jaringan utara (Sulutgo) dan selatan (Sulbagsel) menjadi satu sistem yang saling terhubung.

Interkoneksi akan dilakukan melalui jalur Moutong-Tambu-Talise (menggunakan satu jalur dan dua jalur 150 kV sebagai ekstra). Selain interkoneksi, kemampuan DRC akan diimplementasikan, dengan pusat kendali utama ditempatkan di Pusat Kendali Sulawesi di Makassar dan dua DRC yang masing-masing berlokasi di Kendari (Sulawesi Tenggara) dan mungkin Gorontalo (Sulawesi Utara). DRC utama akan berada di Kendari dan DRC sekunder dipertimbangkan akan ditempatkan di Gorontalo.<sup>2</sup> Jika Pusat Kendali Sulawesi gagal, DRC di Kendari akan mengambil alih

<sup>2</sup> Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk merelokasi Pusat Kendali Sulawesi Utara yang ada di Tomohon ke Gorontalo sebagai DRC sekunder. Saat ini Gorontalo belum mempunyai infrastruktur pengendalian yang sesuai. Pusat kendali yang ada di Tomohon memiliki keandalan yang lebih baik karena terhubung dengan

seluruh sistem. Jika utara dan selatan terputus, DRC di Gorontalo akan mengoperasikan subsistem utara secara mandiri, sedangkan Pusat Kendali Sulawesi (Makassar) atau DRC (Kendari) akan mengoperasikan subsistem selatan. Untuk mengoperasikan jaringan listrik secara andal, Pusat Kendali Sulawesi dan DRC harus dapat melakukan rotasi peran. Praktik terbaik industri adalah beralih di antara peran utama dan cadangan setiap bulan atau kapan pun berlangsung pembaruan pemodelan yang signifikan.

Selain itu, RUPTL (rencana bisnis ketenagalistrikan PLN) tahun 2021-2030 mengantisipasi interkoneksi sistem di Raha dan Bau-Bau atau sistem Sulawesi yang lebih besar pada tahun 2026.

### ***Apa Artinya Bagi Pusat Kendali?***

- Untuk integrasi sistem utara dan selatan, ada dua isu yang harus dievaluasi dan dikelola: pertama adalah mendeteksi osilasi dan kedua adalah kontingensi N-1 dalam menjalankan mode pulau. Tersambungannya jaringan utama Sulawesi ke wilayah Gorontalo dan Utara melalui interkoneksi transmisi radial panjang menimbulkan potensi ketidakstabilan jaringan. Selanjutnya, jika sistem utara dan selatan terputus karena pemadaman paksa, pembukaan manual, atau kejadian lainnya, sistem harus dirancang untuk memiliki kemampuan memantau dan mengendalikan tegangan dan frekuensi masing-masing pulau secara mandiri. Hal ini dapat dilakukan dengan komunikasi jarak jauh dari Pusat Kendali Sulawesi atau DRC (Kendari), atau dengan kemampuan ekstra di DRC di Gorontalo.
- Pemasangan generator sumber daya berbasis inverter seperti sistem penyimpanan tenaga angin, surya, dan baterai dapat menimbulkan kekhawatiran lebih lanjut seputar ketidakstabilan, karena pengalaman menunjukkan bahwa penurunan inersia sistem dapat berdampak negatif terhadap stabilitas jaringan dinamis. Pemasangan sistem pemantauan area luas (WAMS) yang menggunakan instalasi unit pengukuran fasor (PMU) selektif dapat digunakan untuk memantau dan mendeteksi masalah ketidakstabilan jaringan. Sistem pemantauan, perlindungan, dan pengendalian area luas (WAMPAC) yang dibahas di bawah ini juga dapat digunakan untuk memulai skema tindakan perbaikan otomatis guna memulai pemutusan arus jika terjadi ketidakstabilan.
- Pusat kendali akan dikonsolidasikan dari dua pusat kendali terpisah menjadi satu pusat kendali utama dan satu DRC.
- Dengan penggabungan pusat kendali di satu lokasi, sistem manajemen energi (EMS) tunggal akan disediakan untuk sistem yang saling terhubung. Ini berarti kumpulan data dan jalur komunikasi perlu digabungkan dan diintegrasikan di EMS yang baru.
- Pengadaan satu EMS harus dilakukan berdasarkan visi Sulawesi dan panduan OT.
- Perangkat keras komputasi harus ditingkatkan untuk EMS interkoneksi baru, sehingga mendukung infrastruktur yang andal seperti server, stasiun kerja, dan pasokan cadangan daya serta persediaan ekstra.
- Ukuran jaringan akan meningkat, yang berarti peningkatan jumlah aset yang harus dipantau dan dikendalikan dalam operasi real-time. Hal ini akan memerlukan lebih banyak penyediaan, kemampuan pengendalian lebih tinggi, lebih banyak perlindungan, dan perangkat pengendalian tambahan.

---

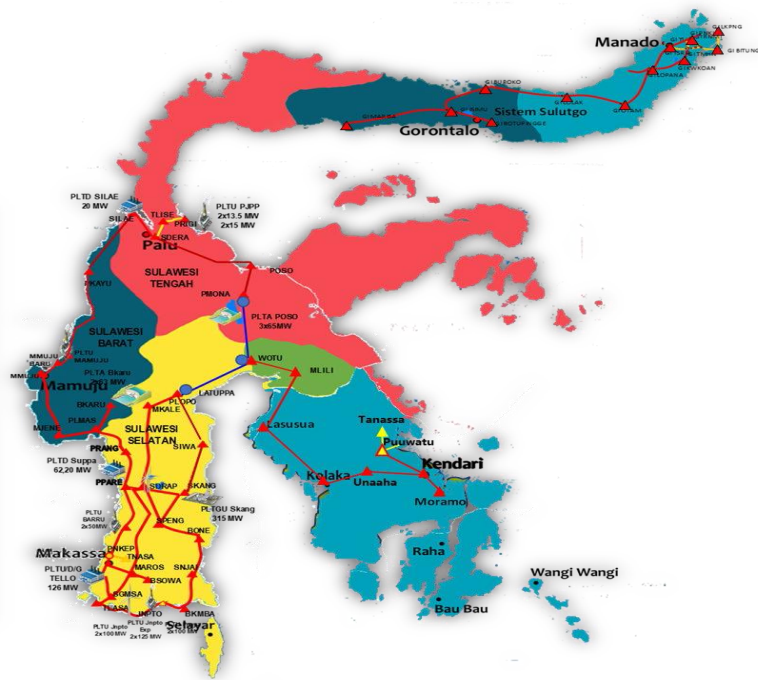
transmisi cincin ganda (66 kV dan 150 kV), sedangkan Gorontalo hanya memiliki konektivitas radial.

- Ukuran jaringan yang akan dikontrol akan meningkatkan jumlah titik yang perlu dipantau, serta analog dan jumlah kejadian penyediaan dan pemadaman yang direncanakan.
- Aset yang ada di jaringan harus diganti atau diperbarui, yang akan memerlukan peningkatan pemadaman yang dijadwalkan dan dikelola secara real-time.
- Jumlah perangkat perlindungan dan kendali yang dibutuhkan pada jaringan akan meningkat.
- Skema perlindungan khusus yang diperlukan kemungkinan akan meningkat, begitu pula skema tindakan perbaikan dan WAMPAC.
- Jumlah perangkat pintar untuk mengendalikan aliran daya di jaringan akan meningkat, seperti kompensator VAR statis, kompensator sinkron statis, rating saluran dinamis, kendali aliran daya, dan teknologi peningkatan jaringan lainnya.

Prosedur pelatihan dan dokumentasi yang komprehensif akan diperlukan untuk pengoperasian yang terhubung sehingga operator mana pun dapat mendukung jaringan Sulawesi. Operator harus dilatih tentang semua perangkat dan perlindungan serta kendali baru di jaringan.

- Dengan semakin banyaknya perangkat dan jaringan yang terbuka untuk melayani masyarakat, kebijakan keamanan siber harus dievaluasi kembali.
- Titik operasi jaringan kemungkinan akan berubah seiring dengan perubahan topologi jaringan transmisi, sehingga memerlukan optimalisasi jaringan semaksimal mungkin.
- Stabilitas jaringan dapat menurun seiring dengan perubahan pembangkitan konvensional dan bertambahnya panjang jaringan, yang mungkin memerlukan kemampuan simulasi tambahan.
- Gangguan dan kesalahan besar kemungkinan akan meningkat pada jaringan karena kejadian yang berdampak tinggi dan kecil kemungkinannya seperti badai, topan, petir, dan lain-lain.

Jalur Transmisi PLN Sulawesi (per 2023)



Pertumbuhan Jalur Transmisi PLN Sulawesi pada Masa Depan (~2030)



Gambar 4. Jalur transmisi Sulawesi, 2023 vs. pertumbuhan pada masa depan

Sumber: RUPTL, 2021–2030

## 2.5 Ringkasan

Jaringan PLN Sulawesi akan saling terhubung pada tahun-tahun mendatang, yang akan membawa pertumbuhan besar dalam ukuran dan kompleksitas jaringan yang harus dikelola oleh pusat kendali. Untuk melakukannya, PLN akan menggabungkan dua pusat kendali dan EMS terpisah menjadi satu EMS untuk sistem yang saling terhubung dan satu pusat kendali utama dengan DRC.

Selain itu, PLN memperkirakan adanya peningkatan pesat dalam proyeksi beban pada tahun-tahun mendatang, di mana mereka berencana untuk menyambungkan sejumlah besar sumber daya dan permintaan pembangkitan serta infrastruktur jaringan transmisi. Peningkatan ukuran



dan kapasitas jaringan ini akan menimbulkan dampak berant yang signifikan terhadap pengoperasian jaringan dalam domain perencanaan operasi dan operasi waktu nyata. Hal ini memerlukan peningkatan kemampuan operasional di seluruh domain operasi: operasi real-time; perencanaan, prakiraan, dan simulasi; serta kemampuan memprediksi dan pengoptimalan. Model Kemampuan Operasional (OCM) Lembaga Penelitian Tenaga Listrik yang digunakan dalam panduan ini memberikan kerangka kerja yang telah teruji untuk menilai kebutuhan kemampuan utilitas yang sedang mengalami transformasi radikal. Bagian berikut ini akan digunakan untuk menilai status dan memproyeksikan jalur menuju CCOTF yang lebih terintegrasi dan dapat dioperasikan.

### 3 Pernyataan Visi dan Misi PLN

Saat mengembangkan panduan untuk masa depan operasi dan pusat kendali, penting untuk memastikan arah korporat dari perusahaan utilitas selaras dan merupakan bagian inti dari visi. PLN memiliki pernyataan visi dan misi yang ambisius untuk menyesuaikan dengan proyeksi tingkat pertumbuhan jaringan mereka pada masa depan.

#### 3.1 Visi PLN

“Menjadi unit transmisi dan pusat kendali sistem terkemuka di Asia Tenggara berdasarkan kualitas sumber daya manusia yang bermoral baik.”<sup>3</sup>

#### 3.2 Misi PLN

- Mengelola operasi sistem tenaga listrik dengan andal
- Melaksanakan dan mengelola transmisi tenaga listrik tegangan tinggi secara efisien, andal, dan ramah lingkungan
- Mengelola transaksi ketenagalistrikan secara kompetitif, transparan, dan adil
- Mengelola pemeliharaan instalasi sistem transmisi tenaga listrik
- Mengelola sumber daya dan aset perusahaan secara efisien, efektif, dan sinergis untuk menjamin pengelolaan usaha yang optimal dan memenuhi standar kesehatan, keselamatan, lingkungan, dan keamanan kerja, serta dengan menggunakan prinsip tata kelola perusahaan yang baik.

---

<sup>3</sup> PLN. 2023. “Nilai Inti dan Organisasi.” Disajikan pada April 2023.

## 4 Kerangka Desain CCOTF

### 4.1 Pendekatan Tradisional pada Desain Pusat Kendali

Pada umumnya, desain pusat kendali dan peningkatan kemampuan operasional cenderung merupakan pengulangan dari infrastruktur dan desain yang sudah ada sebelumnya. Namun, sistem tenaga listrik di Sulawesi (dan jaringan listrik secara umum di seluruh dunia) tengah mengalami pergeseran dan perkembangan yang radikal. Hal ini didorong oleh:

- Sumber daya baru, seperti sumber daya energi terbarukan dan terdistribusi yang bervariasi
- Pasar energi dan layanan tambahan, jika tersedia
- Perangkat pintar baru serta perlindungan dan kendali
- Teknologi informasi (IT) dan OT baru, seperti komputasi awan, visualisasi data, dan pembelajaran mesin
- Ketersediaan luas dan ketergantungan pada aplikasi perangkat lunak dan aliran data untuk pengoperasian jaringan.

### 4.2 Visi G-PST CCOTF

Pada tahun 2023, Lembaga Penelitian Tenaga Listrik bersama dengan Konsorsium Transformasi Sistem Tenaga Global (G-PST) mendirikan operator sistem (Operator Pasar Energi Australia, Operator Sistem Independen California, EirGrid, Energinet, Dewan Keandalan Listrik Texas, dan National Grid Electricity System Operator Ltd.) mengembangkan visi CCOTF, yang disajikan dalam dokumen resmi.<sup>4</sup> Visi ini berlaku bagi semua pusat kendali transmisi, apa pun fungsinya, dengan perincian sebagai berikut:

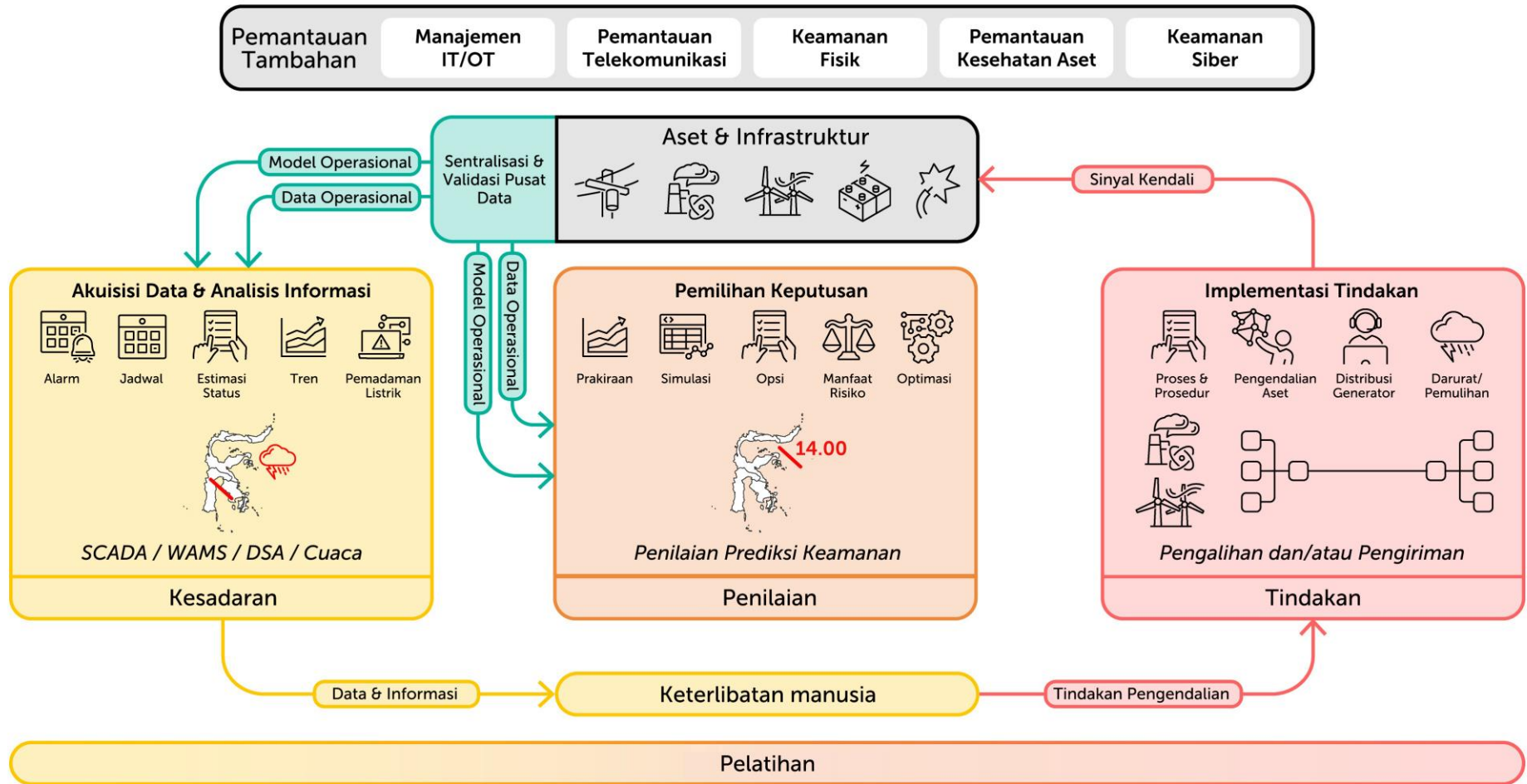
- Model dinamis yang akurat, divalidasi, dikelola secara terpusat serta data operasional yang efisien mengisi toolkit OT dalam arsitektur yang termodulasi dan berorientasi layanan. Toolkit operasional menyediakan tindakan kendali otomatis yang aman kepada aset jaringan dan pelaku pasar, dengan dukungan keputusan yang memungkinkan operator menyesuaikan sistem atau melakukan intervensi jika diperlukan.
- Toolkit OT memiliki proses paralel untuk penilaian keandalan dan keamanan secara real-time dan prakiraan status pada masa depan yang akan dinilai oleh operator, sehingga memungkinkan mereka untuk menyesuaikan sistem sebelumnya. Aplikasi pembelajaran mesin yang dilatih tentang kumpulan data operasional dikerahkan untuk meningkatkan domain pemantauan dan penilaian operasi dan dukungan keputusan.

---

<sup>4</sup> G-PST. *Visi untuk Ruang Kendali Masa Depan*. Washington, DC: Lembaga Penelitian Tenaga Listrik. <https://globalpst.org/wp-content/uploads/G-PST-Vision-for-the-Control-Room-of-the-Future-V0.5-Final.pdf>.

- Proses manual bersifat otomatis dan harus ada hubungan yang jelas antara berbagai proses di simulator operasional dan pelatihan atau pusat kesiapan operasi (ORC). Setiap proses harus memiliki desain tampilan yang konsisten pada peralatan tampilan terdepan di lingkungan fasilitas pusat kendali yang aman dan tahan pandemi.
- Operator berfokus pada proses berbasis pengetahuan, memantau, dan mendiagnosis risiko sistem, serta memprakirakan lintasan berbarengan dengan toolkit OT. Operator harus dilatih sebagai pengawas sistem otomatis secara real-time, melakukan intervensi secara aman dalam keadaan darurat, atau untuk mengatasi kesalahan pengoperasian otomatisasi. Mereka harus memiliki pengetahuan tingkat lanjut dan pengetahuan teknik untuk penilaian risiko dan pengelolaan risiko yang diprakirakan.

## RUANG KENDALI VISI MASA DEPAN



Gambar 5. Visualisasi grafis dari visi CCOTF berdasarkan pernyataan visi dari laporan CCOTF G-PST tahun 2023

Sumber: EPRI

Pernyataan visi dapat divisualisasikan dengan representasi grafis yang ditunjukkan pada Gambar 5. Grafik ini menunjukkan tiga mode OT dengan kode warna berbeda, yang berpadu dengan visualisasi situasional dan ergonomis operator. Pada dasarnya ada tiga mode kesadaran dan pengambilan keputusan operator, seperti yang dijelaskan di bawah ini.

- Paham – Untuk melakukan akuisisi data dan analisis informasi diperlukan kemampuan interpretasi. Secara umum, informasi terdiri dari data dan konteks. Dalam mode ini, operator memadukan dan menafsirkan data, mendefinisikan masalah tertentu sesuai dengan konteks.
- Penilaian - Pemilihan keputusan. Alat prakiraan, simulasi, dan pengoptimalan memberi operator dan perangkat kendali otomatis berbagai keputusan dan kemungkinan solusi. Dalam beberapa kasus, tindakan optimal diterapkan secara otomatis pada aset sesungguhnya, sementara pada kasus lain, operator manusia harus melakukan intervensi untuk menilai dan mengambil keputusan yang tepat.
- Tindakan - Keputusan diaktualisasikan.

Model tiga mode ini selaras dengan model kesadaran situasional lainnya, seperti:

- Periksa, berfokus, bertindak
- Amati, arahkan, putuskan, bertindak
- Pengambilan keputusan yang mengutamakan pengakuan
- Persepsi, pemahaman, proyeksi.

Tujuan dari visualisasi ini adalah untuk menunjukkan bagaimana aset fisik, data dan model, OT, faktor manusia, dan peralatan visualisasi dipadukan untuk menghasilkan visi yang holistik dan inovatif untuk masa depan operasi.

Pengodean warna dalam grafik disengaja dan menggambarkan tiga tahap kesadaran menurut Kode Warna Cooper: kuning untuk kesadaran, oranye untuk kewaspadaan, dan merah untuk tindakan. Pengodean kuning, oranye, dan merah ini juga harus dimasukkan ke dalam desain visualisasi dan rasionalisasi alarm.

### **4.3 OCM dari Lembaga Penelitian Tenaga Listrik**

Setelah visi CCOTF ditetapkan, berbagai elemen kemampuan yang mendasari pusat kendali dapat disusun dan diselaraskan, sehingga kesenjangan dapat diidentifikasi, dan panduan dapat dikembangkan. EPRI telah mengembangkan kerangka kerja OCM, yang digambarkan pada Gambar 6 di bawah, untuk mengatur dan membantu memvisualisasikan bagaimana kapabilitas tersebut berhubungan satu sama lain.

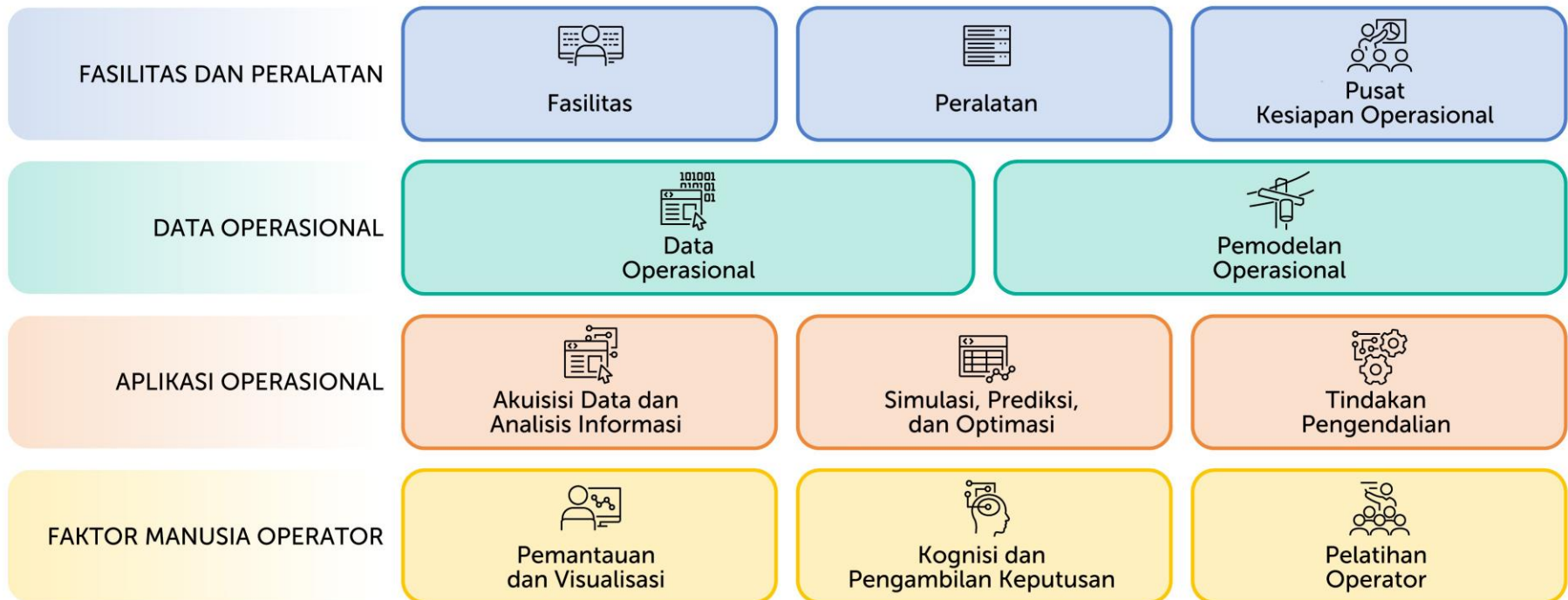
OCM mengelompokkan 11 kemampuan operasional inti ke dalam empat lapisan yang komprehensif:

- Fasilitas dan Peralatan
- Teknologi Operasional

- Data Operasional
- Faktor manusia.

11 kemampuan tersebut ditunjukkan pada Gambar 6. Hal ini akan diperluas pada bagian selanjutnya untuk pengembangan panduan bagi masing-masing pilar.

### PUSAT KENDALI MASA DEPAN - MODEL KEMAMPUAN OPERASIONAL



Gambar 6. Kerangka kerja CCOTF, menunjukkan 11 kemampuan operasional berkode warna dalam empat blok inti

Sumber: EPRI

## 5 Data Operasional CCOTF

### 5.1 Pendorong Perubahan dan Visi CCOTF

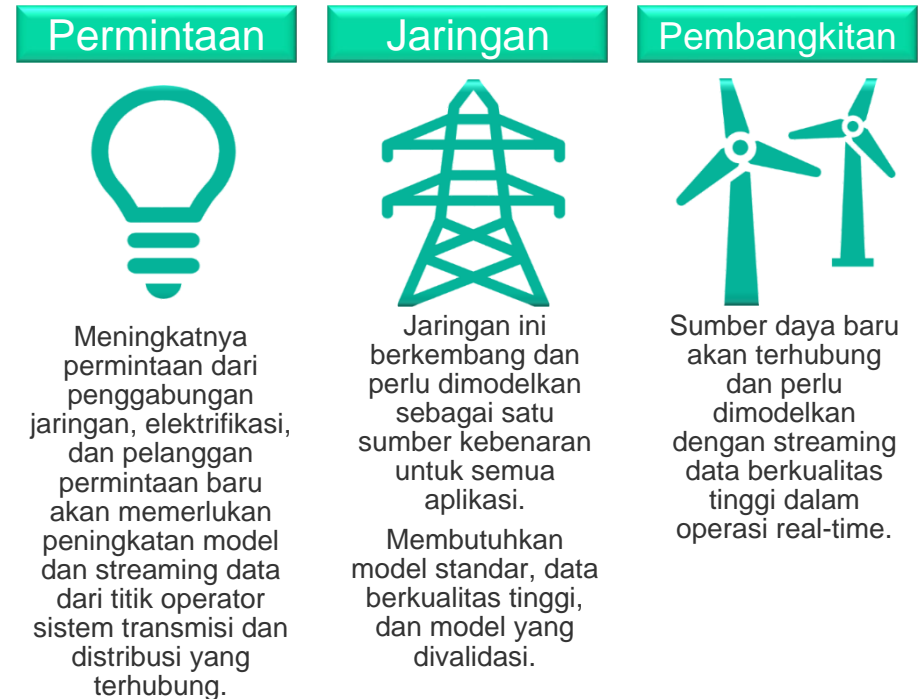
Data adalah kemampuan yang mendasari semua kemampuan pusat kendali. Tanpa data, sistem OT tidak dapat beroperasi, dan operator tidak dapat menjaga kesadaran situasional.

Saat mempertimbangkan data, kerangka kerja CCOTF membagi kemampuan menjadi dua: **model operasional** (termasuk kuadrat rata-rata ruangan, dinamis, transien elektromagnetik, model distribusi ekonomis, dan perlindungan hubungan singkat) **dan data operasional** (termasuk kendali pengawasan dan akuisisi data [SCADA], data distribusi, PMU, perekam kesalahan digital, dan data protokol komunikasi di antara pusat kendali).

### 5.2 Nilai Pengembangan dan Peningkatan Pengelolaan Data Pusat Kendali

Pengembangan model operasional dan kemampuan streaming data untuk tim operasi dan pusat kendali akan memungkinkan pengoptimalan sumber daya manusia, menghilangkan duplikasi, dan memastikan keakuratan di semua sistem. Data dalam sistem dapat divalidasi sehingga diperoleh kepercayaan terhadap keakuratan model dan alat untuk analisis yang lebih mendetail seperti penilaian stabilitas.

Selain itu, PLN dapat mempertimbangkan untuk menyediakan data operasional bagi masyarakat luas untuk memanfaatkan nilai yang diberikan kepada komunitas energi dan perekonomian Indonesia yang lebih luas. Hal ini akan memungkinkan perusahaan untuk membangun diri mereka sendiri berdasarkan data terbaik yang tersedia dan memungkinkan industri energi mengambil keputusan yang paling menguntungkan untuk berinvestasi pada kemampuan teknis dan penawaran layanan.



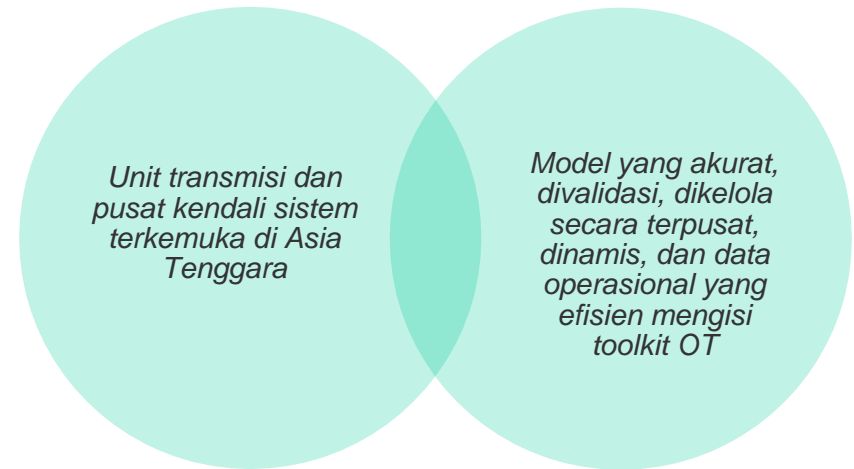
Gambar 7. Visi CCOTF ∞ Visi PLN

### **Model Operasional**

Meskipun terdapat beberapa domain waktu simulasi operasional, tujuannya harus berupa satu model yang dikelola dari satu repositori terpusat, yang melayani semua sistem yang memerlukan simulasi. Misalnya, pembangkit memiliki format tertentu untuk penaksir status EMS dan model dinamis yang lebih terperinci untuk simulasi penilaian stabilitas dinamis, namun parameter modelnya harus dikelola secara terpusat dalam format standar, seperti Model Informasi Umum Komisi Elektroteknik Internasional (IEC CIM) menggunakan nomor referensi ID unik. Penting untuk membuat perbedaan dalam pemodelan operasional, karena jenis alat dan simulasi yang diperlukan dalam domain operasi berbeda dengan domain perencanaan, dan biasanya dikelola secara terpisah. Tujuannya di seluruh perusahaan harus menjadi repositori terpusat untuk domain perencanaan maupun operasional.

### **Data Operasional**

Data operasional mengacu pada data yang dimasukkan ke OT pusat kendali secara real-time dari aset fisik pada sistem. Biasanya, data ini terutama berasal dari data SCADA, namun saat ini, data yang lebih terperinci dari aset perangkat elektronik cerdas PMU dan gardu induk<sup>5</sup> tersedia bagi operator sistem. Secara umum, meskipun data ini mungkin berguna, pertimbangan yang cermat harus diberikan terhadap bagaimana data ini ditata, diatur, dan terstruktur, untuk meningkatkan pengambilan keputusan dan menghindari informasi yang berlebihan. Pengelolaan streaming data dan data model akan menjadi faktor kunci untuk menggunakan pembelajaran mesin dan teknik analitik data dalam CCOTF.



**Gambar 8. Visi untuk model data**

<sup>5</sup> Meskipun saat ini tidak digunakan di sistem PLN, pada masa mendatang hal ini dapat dikirimkan melalui protokol IEC 61850.



### Model Jaringan CCOTF dan Pengelolaan Data Operasional

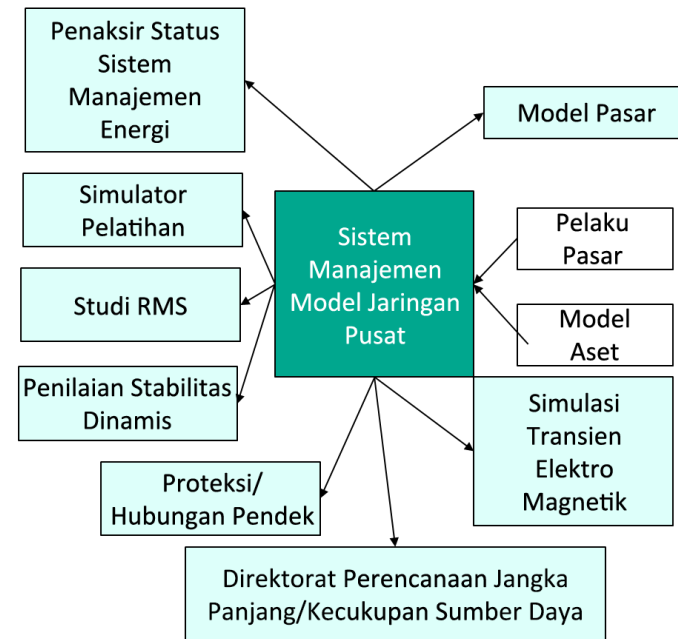
Sistem pengelolaan model terpusat memiliki model sistem berbasis tunggal yang otoritatif dalam basis data yang dikelola secara terpusat yang diberikan kepada semua sistem yang memerlukan data model untuk simulasi dan analisis. Ini sesuai dengan standar IEC CIM dan dapat beroperasi sebagai direktori aset atau sistem informasi geografis. Sistem ini menggunakan variasi sistem dasar untuk peningkatan pada mendatang atau yang direncanakan. Memanfaatkan satu model yang dikelola oleh satu tim ahli pemodelan yang mendukung semua sistem lainnya memiliki manfaat yang jelas untuk keakuratan operasi sistem dan pengurangan kesalahan. Manajer model terintegrasi dalam EMS/SCADA dapat berfungsi sebagai sistem manajemen model pusat; sebagai alternatif, sistem manajemen model eksternal dapat digunakan. Data operasional juga dapat dikelola secara terpusat dalam arsitektur “data lake”. Basis data operasional yang dikelola secara terpusat harus:

- Terstruktur
- Terpusat
- Distandardisasi
- Didokumentasikan
- Divalidasi
- Berkualitas tinggi
- Andal dan tangguh
- Tersedia dan dapat diakses.

Dengan mengupayakan struktur data operasional dan pemodelan berbasis CIM dengan cara ini, proses pengintegrasian alat baru akan disederhanakan. Memiliki sistem repositori pusat untuk mengelola model jaringan akan lebih efisien dari sudut pandang sumber daya manusia dan akan menghilangkan kesalahan pemodelan. Menata data dan membuatnya mudah tersedia akan lebih memudahkan pemanfaatan teknik pembelajaran mesin untuk memecahkan masalah sistem pada masa depan.

### Validasi Model Jaringan

Memusatkan model dan kemampuan pengelolaan data serta memvalidasi model juga akan menjadi kunci yang mendasari kemampuan CCOTF. Karena semakin banyak aset (pembangkit, permintaan, sumber daya energi terdistribusi, RES, sistem transmisi AC fleksibel, dll.) yang akan ditambahkan ke jaringan, memastikan bahwa seluruh model sistem menunjukkan aset jaringan aktual yang dibangun secara akurat akan



Gambar 9. Memanfaatkan sistem manajemen model terpusat

menjadi hal yang sangat penting. Kecuali jika model dikelola secara terpusat, seiring dengan perluasan jaringan dan sistem simulasi baru, terdapat risiko divergensi model. Cara terbaik untuk memitigasi perbedaan model adalah dengan tata kelola data yang kuat dan validasi model secara teratur, di mana semua model diuji setelah peristiwa besar untuk menilai kinerjanya. Jika ditemukan perbedaan antara kenyataan dan model, model tersebut harus diperbarui. Dalam kasus teknologi peningkatan jaringan yang lebih baru, produsen peralatan asli harus meningkatkan model tersebut. Langkah selanjutnya adalah mengembangkan validasi model otomatis melalui otomatisasi yang memvalidasi dan menyarankan perbaikan setelah setiap kejadian. Validasi model akan menjadi tantangan dengan semakin banyaknya sumber daya energi terdistribusi yang terhubung di jaringan distribusi, sehingga mengembangkan kemampuan validasi model akan menjadi faktor penting bagi CCOTF.

### 5.3 Panduan untuk Data Operasional CCOTF

Tabel 1. Panduan untuk Data Operasional CCOTF

	Keadaan Saat Ini 2023	Kemungkinan tahun 2025	Ulasan 2027	Kemungkinan tahun 2030	Keadaan Masa Depan 2030+	Keadaan Visi
<b>Model Operasi</b>	<p>Penilaian dan inventarisasi seluruh data model dan parameter dengan pemilik data dan sistem simulasi.</p> <p>Kesenjangan yang diketahui meliputi: data distribusi, konsistensi model antara alat dan aplikasi, validasi model, dan kemampuan pengarsipan.</p>	<p>Penetapan tata kelola data dan tanggung jawab untuk semua data model.</p>	<p>Sistem manajemen model terpusat untuk mengelola semua model dalam domain operasional dengan potensi untuk menggabungkan domain perencanaan.</p>	<p>Validasi model otomatis setelah kejadian dengan saran penyesuaian otomatis.</p>	<p>Model data dapat dioperasikan dengan sektor lain di sektor energi. Kembaran digital sektor energi Sulawesi/Indonesia.</p>	<p>Sumber kebenaran tunggal untuk semua data jaringan, dapat diakses oleh semua orang, dan divalidasi secara otomatis.</p>
<b>Data Operasional</b>	<p>Penilaian dan inventarisasi semua data dan sistem operasional pusat kendali, termasuk tautan pembagian data.</p>	<p>Penetapan kendali kualitas data. Standardisasi dan struktur data untuk analitik dan pembelajaran mesin.</p>	<p>Pusat data terpusat untuk semua data operasional dengan akses aman ke pakar di bidangnya untuk dianalisis.</p>	<p>Pemanfaatan teknik kecerdasan buatan/pembelajaran mesin untuk memecahkan masalah operasional.</p>	<p>Pusat yang dapat diakses secara eksternal untuk data operasional bagi semua pemangku kepentingan yang berkepentingan.</p>	

## 6 OT CCOTF

### 6.1 Pendorong Perubahan dan Visi CCOTF untuk OT

Sistem EMS/SCADA adalah bagian penting dari semua pusat kendali di seluruh dunia. EMS/SCADA adalah sistem “monolitik” atau tertutup yang memerlukan penggantian atau peningkatan secara penuh ketimbang sedikit demi sedikit.

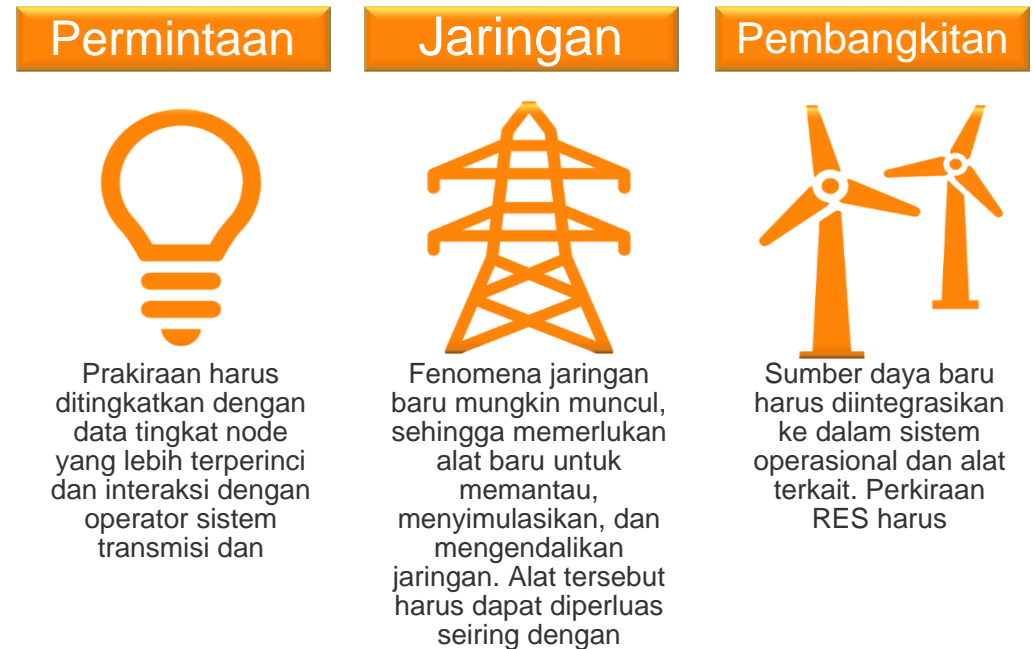
Vendor EMS/SCADA memiliki panduan produk mereka sendiri yang menyertakan penelitian dan pengembangan pribadi. Ini tidak tersedia untuk industri dan komunitas yang lebih luas karena pembatasan kekayaan intelektual. EMS/SCADA biasanya sudah ada setidaknya selama 5–7 tahun sebelum memerlukan peningkatan atau penggantian, yang dapat berupa proyek pembaruan teknologi informasi dan komunikasi yang besar dan padat sumber daya.

#### *Wawasan dari Pengadaan*

Peningkatan atau penggantian EMS/SCADA harus didasarkan pada visi dan misi perusahaan. Setelah sistem EMS/SCADA dievaluasi untuk memenuhi visi dan misi, pembeli harus mengevaluasi opsi untuk persyaratan sistem.

Wawasan berikut dari operator sistem independen di Amerika Serikat menyoroti beberapa faktor utama yang patut dipertimbangkan ketika mengevaluasi persyaratan sistem untuk peningkatan atau penggantian EMS/SCADA:

1. Modularitas dalam konteks EMS/SCADA memerlukan aplikasi yang dapat berfungsi secara independen, sehingga memungkinkan pemanfaatan komputasi terdistribusi. Misalnya, satu server dapat menangani analisis kontingensi real-time dengan lancar, sementara server lainnya mengelola aliran daya. Modularitas memerlukan desain arsitektur, antarmuka subsistem, dan protokol komunikasi yang mendukung kemampuan “plug-and-play” sehingga memungkinkan penggantian tiap komponen tanpa mengganggu operasi sistem lainnya. Modularitas memfasilitasi fleksibilitas sistem, merespons perubahan kebutuhan pengoperasian dan opsi solusi.



**Gambar 10. Pendorong utama perubahan**

2. Kebutuhan akan pembaruan muncul karena perusahaan utilitas perlu melakukan perubahan bertahap pada perangkat lunak EMS/SCADA, ketimbang melakukan pembaruan yang memakan waktu bertahun-tahun untuk mengintegrasikan patch atau perbaikan sistem yang ringan. Misalnya, menerapkan patch keamanan untuk sistem operasi setiap triwulan atau bulanan akan membantu melindungi sistem. Perangkat lunak EMS/SCADA harus mematuhi praktik terbaik sehingga perusahaan utilitas dapat mengadopsi berbagai fitur yang telah terbukti sesuai kebutuhan.
3. Skalabilitas memungkinkan operasi pusat kendali untuk tumbuh dan bekerja sejalan dengan pertumbuhan dan perubahan sistem tenaga listrik pada masa depan. EMS/SCADA harus dapat ditingkatkan untuk mengakomodasi perangkat tambahan, sumber data, dan peningkatan permintaan akan fungsionalitas seiring dengan perkembangan jaringan listrik.
4. Interoperabilitas, di sisi lain, melibatkan kemampuan untuk menerima dan berbagi data serta keluaran di antara aplikasi independen. Vendor mungkin menawarkan arsitektur berorientasi layanan untuk memfasilitasi antarmuka yang diperlukan, namun tantangan dapat muncul selama implementasi. Semua tantangan ini mungkin disebabkan oleh kemampuan teknis pembeli, namun merupakan tanggung jawab vendor untuk memberikan dukungan di seluruh proses implementasi.
5. Keamanan siber adalah fitur yang sangat penting, karena sistem EMS/SCADA dapat menjadi target serangan siber yang bernilai tinggi. Prioritaskan keamanan siber dalam proses pengadaan dan pastikan sistem yang dipilih memiliki fitur keamanan yang kuat, termasuk enkripsi, kendali akses, dan deteksi intrusi.
6. Kemampuan simulator pelatihan operasional harus mampu mendukung pemulihan operasi ruang kendali jika sistem EMS/SCADA utama maupun cadangan tidak tersedia.
7. Kemampuan konfigurasi memberikan perusahaan utilitas fleksibilitas untuk mengatur parameter sistem EMS/SCADA dan fitur pengoperasian seperti, di antaranya, desain dan konfigurasi satu jalur SCADA, atribut yang mengkhawatirkan, dan penentuan prioritas.
8. Vendor harus memberikan dukungan berkelanjutan, termasuk pembaruan, pemecahan masalah, dan bantuan teknis, dengan biaya dan gangguan operasional minimal.
9. Sepanjang proses pengadaan, termasuk desain spesifikasi, negosiasi kontrak, pengujian, dan pengembangan panduan pengguna, dokumentasi harus tersedia dan mudah diikuti untuk memfasilitasi pemecahan masalah selama tahap pengoperasian.

Visi CCOTF menekankan sistem EMS/SCADA sebagai sistem yang dapat dioperasikan dengan semua alat operasional dan pusat kendali lainnya, serta alat pendukung perencanaan operasi dan sistem distribusi ekonomis apa pun. Hal ini terutama dapat dilakukan melalui pertukaran data dan sistem manajemen model yang diatur oleh CIM (lihat Bagian 5, Data Operasional).

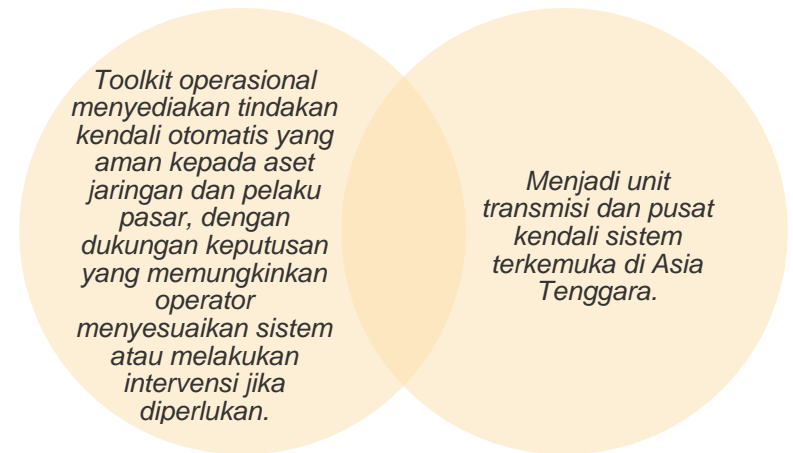
Yang terkait dengan sistem distribusi ekonomis dan sistem EMS/SCADA adalah alat pusat kendali lainnya yang penting untuk mengoperasikan sistem. Alat ini bisa berupa aplikasi atau platform perangkat lunak atau bahkan perangkat lunak sebagai layanan dari vendor eksternal. Secara umum, mereka dihubungkan melalui koneksi data yang disesuaikan dengan data dari sistem EMS/SCADA. Alat pusat kendali dapat mencakup optimalisasi tegangan, prakiraan permintaan, prakiraan pembangkitan energi terbarukan, WAMS, aplikasi pencatatan, manajemen tenaga kerja, dan pemantauan aset. Beberapa di antaranya dapat berupa aplikasi atau modul dalam sistem EMS/SCADA dan tidak harus merupakan sistem IT yang terpisah.

Interoperabilitas antara sistem EMS/SCADA dan alat lainnya dapat menjadi hambatan teknis yang signifikan dengan penetrasi RES yang sangat bervariasi, karena lebih banyak data/alat heterogen yang harus diintegrasikan ke dalam sistem EMS/SCADA. Seperti yang telah dibahas di Bagian 5, pendekatan yang bijaksana terhadap pengelolaan data model operasional yang memanfaatkan fitur pembagian data berbasis standar di antara aplikasi pusat kendali akan menjadi sangat penting. Standar IEC CIM direkomendasikan ketika merancang dan menerapkan sistem manajemen model terpusat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. Dengan mempertahankan model kisi bawaan yang akurat, berbagai aplikasi pusat kendali yang memerlukan data model menjadi konsumen data melalui lapisan integrasi standar, sehingga menghilangkan kebutuhan untuk memelihara model kisi di berbagai aplikasi. Interoperabilitas ini juga menghilangkan kebutuhan akan desain dan pemeliharaan banyak integrasi data khusus di antara aplikasi.

Divisi Perencanaan Sistem di PLN harus mempelajari jaringan dalam jangka waktu yang lebih lama dibandingkan operator sistem real-time, dalam jangka waktu berminggu-minggu atau berbulan-bulan sebelumnya. Umumnya, para insinyur di tim ini menggunakan seperangkat alat serupa yang lebih kecil yang digunakan oleh operator pusat kendali yang bekerja secara real-time. Alat pendukung perencanaan operasi harus dapat dioperasikan dengan alat pusat kendali dan sistem EMS/SCADA, memanfaatkan model bawaan sistem terkendali yang sama, seperti yang telah dibahas sebelumnya, dan data sistem streaming yang identik; misalnya, pemadaman listrik harus dipelajari berdasarkan permintaan dan prakiraan sumber daya terbarukan serta jadwal pembangkitan listrik yang sebisa mungkin disinkronkan dengan operasi real-time.

## 6.2 Nilai Pengembangan OT Pusat Kendali

Mengembangkan dan meningkatkan sistem EMS/SCADA dan alat pusat kendali harus mengarah pada pengurangan kesalahan, bahkan ketika sistem diperluas secara signifikan. Sistem ini harus meningkatkan keandalan, mengurangi risiko gangguan sistem skala besar dengan memiliki kemampuan prakiraan dan penelitian yang canggih, dan, ketika gangguan terjadi, sistem tersebut harus menyediakan sistem yang memadai untuk memulihkan layanan secepat mungkin.



**Gambar 11. Visi CCOTF ∞ Visi PLN**

## **Persyaratan Operasional OT CCOTF**

Operator dapat menggunakan tiga mode kesadaran situasional dan pengambilan keputusan operasional secara real-time:

- Paham – Pemantauan - perolehan dan analisis informasi
- Kewaspadaan - Pengambilan keputusan - simulasi, penilaian risiko
- Tindakan -kendali.

Semua alat pusat kendali OT melayani setidaknya salah satu domain ini. Operator bisa sangat efektif jika alat yang mereka gunakan mudah digunakan dan diinterpretasikan, stabil, andal, dan tangguh. Idealnya, alat harus berkoordinasi satu sama lain secara lancar, dengan sistem manajemen model jaringan dan sistem EMS/SCADA yang dapat dioperasikan satu sama lain. Pemrosesan manual (seperti entri data) harus dihilangkan sebisa mungkin. Misalnya, penggunaan kendali pembangkitan otomatis (AGC) di Sulawesi saat ini bergantung pada percakapan telepon setelah operator memberikan instruksi kepada petugas distribusi mengenai titik yang ditetapkan. Idealnya, AGC harus sepenuhnya otomatis agar dapat dijalankan ketika unit baru mulai bekerja online.

Hasil keluaran atau visualisasi data harus dikonsolidasikan dalam tampilan dan dasbor untuk mengoptimalkan kesadaran situasional (dijelaskan lebih terperinci di Bagian 7).

Dua puluh alat OT diidentifikasi sebagai diperlukan untuk pengoperasian jaringan pada masa depan. Hal ini diperinci dalam Tabel 2, yang mendokumentasikan kemungkinan toolkit operasional pada masa depan berdasarkan tanggung jawab fungsional PLN. Alat tersebut memiliki judul untuk keadaan saat ini, keadaan masa depan yang ideal, dan apakah alat tersebut harus diklasifikasikan sebagai bagian dari domain perolehan informasi dan domain analitik, domain pengambilan keputusan, atau domain kendali.

**Tabel 2. Tabel Alat OT yang Diperlukan Untuk Memantau, Menilai, dan Mengendalikan Sistem PLN Masa Depan**

Pusat Kendali atau Alat Perencanaan Operasi	Perencanaan Real-Time atau Operasional	Informasi, Pengambilan Keputusan, Tindakan Pengendalian	Kondisi Saat Ini	Kondisi Masa Depan Ideal
<b>Manajemen Informasi SCADA</b>	Real-time	Informasi, pengambilan keputusan, kendali	EMS akan ditingkatkan pada tahun-tahun mendatang	Sistem modular, dapat dioperasikan dengan semua alat OT lainnya melalui skema pertukaran data standar. Analitik tingkat lanjut dari data dasar dan tindakan kendali otomatis dapat dilakukan.
<b>Sistem Pemantauan Area Luas (WAMS)</b>	Real-time	Informasi	Tidak ada WAMS	WAMS dapat dioperasikan dengan sistem SCADA/EMS, mengidentifikasi masalah osilasi secara real-time. WAMS digunakan untuk validasi model. Gudang informasi dari perekam digital berkecepatan tinggi dan relai perlindungan.
<b>Manajemen Kemacetan</b>	Perencanaan real-time dan operasional	Informasi, pengambilan keputusan, kendali	Penilaian kontingensi secara real-time	Solusi aliran daya dan kontrol optimal otomatis dengan jaringan dan distribusi ulang secara real-time serta prediksi yang mengurangi kemacetan pada sistem transmisi dan distribusi berdasarkan biaya, dengan probabilitas.
<b>Manajemen Tegangan</b>	Perencanaan real-time dan operasional	Informasi, pengambilan keputusan, kendali	Proses manual untuk kendali daya reaktif dengan penilaian kontingensi	Alat kendali otomatis untuk alat setpoint tegangan yang dioptimalkan dan prediksi berdasarkan lintasan prakiraan, biaya distribusi.
<b>Manajemen Alarm</b>	Real-time	Informasi, pengambilan keputusan, kendali	Manajemen dan respons alarm manual dan tidak konsisten	Pendekatan standar pada manajemen alarm dengan kategorisasi filosofi.



Pusat Kendali atau Alat Perencanaan Operasi	Perencanaan Real-Time atau Operasional	Informasi, Pengambilan Keputusan, Tindakan Pengendalian	Kondisi Saat Ini	Kondisi Masa Depan Ideal
				<p>Struktur standar untuk alarm dan titik data dalam sistem tenaga untuk memungkinkan analitik kecerdasan buatan/pembelajaran mesin.</p> <p>Penanganan alarm cerdas, analisis akar masalah, pemantauan kesehatan aset.</p>
<b>Analisis Akar Masalah Alarm/Alat Investigasi Gangguan (Real-Time)</b>	Real-time	Informasi	Manajemen dan respons alarm manual	Alat pendukung untuk semua data yang mengidentifikasi akar masalah alarm dan gangguan secara instan serta mengarahkan perhatian operator ke masalah dan solusi. Kemungkinan menggunakan pembelajaran mesin.
<b>Penilaian Keamanan Dinamis dan Kualitas Daya (Termasuk Tegangan, Frekuensi, Inersia, Transien, Stabilitas Sinyal Kecil)</b>	Perencanaan real-time dan operasional	Pengambilan keputusan	Tidak ada sistem penilaian keamanan dinamis	Dapat dioperasikan, dengan semua alat menjalankan penilaian stabilitas prediksi dengan mitigasi yang disarankan. Terintegrasi dengan dasbor. Pengalihan penelitian sementara secara otomatis. Potensi tindakan kontrol otomatis. Tautan ke alat evaluasi kekuatan sistem. Tautan ke simulator pelatihan.
<b>Pemodelan dan Penelitian Sementara</b>	Perencanaan operasional	Informasi, pengambilan keputusan	Terbatasnya kemampuan untuk menilai karakteristik dinamis	Menerapkan alat dan penelitian pemodelan sementara yang mampu menilai karakteristik dinamis dan mengintegrasikannya ke dalam langkah-langkah perencanaan.
<b>Alat Evaluasi Kekuatan Sistem</b>	Real-time	Informasi	Tidak ada kekuatan sistem	<p>Alat online untuk memantau kekuatan sistem secara real-time dan memprediksi berdasarkan data prakiraan, potensi kendali otomatis.</p> <p>Tautan ke alat perlindungan penilaian stabilitas dinamis.</p>

Pusat Kendali atau Alat Perencanaan Operasi	Perencanaan Real-Time atau Operasional	Informasi, Pengambilan Keputusan, Tindakan Pengendalian	Kondisi Saat Ini	Kondisi Masa Depan Ideal
<b>Alat Koordinasi Skema Perlindungan, Sirkuit Pendek, dan Perlindungan Khusus</b>	Real-time	Kendali	Tidak ada perlindungan, alat skema perlindungan khusus hubungan singkat	Dapat dioperasikan dengan EMS, dasbor, dan alat kesehatan aset. Memberikan penilaian keamanan dinamis dan dikoordinasikan dengan alat kekuatan sistem dan alat manajemen kemacetan.
<b>Peningkatan Black-Start dan Pemulihan, Termasuk RES</b>	Real-time	Pengambilan keputusan, pengendalian	Tidak ada alat pemulihan black-start	Alat online yang berfungsi selama pemadaman listrik atau pemulihan sistem secara besar-besaran untuk memandu operator melalui proses tersebut.
<b>Prakiraan Permintaan</b>	Perencanaan real-time dan operasional	Informasi	Proses manual dikembangkan sendiri	Pelacakan keakuratan prakiraan secara terus-menerus, peningkatan prakiraan secara terus-menerus dengan data dan metodologi pelanggan yang ditingkatkan.
<b>Prakiraan Energi Terbarukan</b>	Perencanaan real-time dan operasional	Informasi	Tidak ada alat prakiraan	Pelacakan keakuratan prakiraan secara terus-menerus, peningkatan berkelanjutan dalam algoritme prakiraan untuk meningkatkan penetrasi RES.
<b>Penyeimbangan, Distribusi, dan Kendali Frekuensi Beban</b>	Real-time	Kendali	Kendali manual pada generator; AGC	Interaksi dengan pembangkit listrik virtual dan pelaku pasar pada operator sistem distribusi, sesuai kebutuhan.
<b>Cadangan, Penyesuaian Keluaran, Alat Fleksibilitas (Real-Time)</b>	Real-time	Pengambilan keputusan	Proses manual	Terintegrasi dengan pasar dan sistem penyeimbangan, manajemen kemacetan. Deteksi otomatis dan distribusi ulang untuk fleksibilitas.

Pusat Kendali atau Alat Perencanaan Operasi	Perencanaan Real-Time atau Operasional	Informasi, Pengambilan Keputusan, Tindakan Pengendalian	Kondisi Saat Ini	Kondisi Masa Depan Ideal
<b>Manajemen Pemadaman</b>	Perencanaan real-time dan operasional	Informasi, pengambilan keputusan	Berbagai sistem	Penelitian otomatis mengenai pemadaman jangka pendek dan jangka panjang dengan berbagai skenario pembangkitan pasar yang realistis. Alat yang dapat dioperasikan.
<b>Manajemen Pelaporan dan Tenaga Kerja</b>	Real-time	Informasi	Sistem manual	Pencatatan otomatis mengenai personel tenaga kerja lapangan dan pelaporan otomatis masalah sistem, tautan ke dasbor.
<b>Prakiraan Lingkungan (Kebakaran, Gempa Bumi, Banjir, dan Cuaca)</b>	Real-time	Informasi	Berbagai sistem pemantauan cuaca	Semua data cuaca diintegrasikan ke dalam semua alat pusat kendali dengan rentang keyakinan prakiraan. Manajemen kemacetan, koordinasi perlindungan, dan alat stabilitas.
<b>Pemodelan Biaya Produksi dan Distribusi Ekonomis</b>	Perencanaan operasional	Informasi, pengambilan keputusan	Kemampuan pemodelan terbatas	Mengintegrasikan pemodelan biaya produksi dan alat serta kemampuan distribusi ekonomis ke dalam perencanaan dan pengambilan keputusan operasional untuk meningkatkan operasi ekonomi.
<b>Target Daya Aktif dan Reaktif</b>	Perencanaan real-time dan operasional	Pengambilan keputusan, pengendalian		Sertakan target kendali untuk daya aktif dan reaktif semua sumber daya, termasuk sumber daya berbasis inverter guna mendukung AGC dan alat kendali tegangan.

## 7 Faktor Manusia dan Pendukung Keputusan CCOTF

### 7.1 Pendorong Perubahan dan Visi CCOTF untuk OT

Pilar OCM yang memiliki banyak aspek ini dimaksudkan untuk mencakup interaksi manusia dengan aplikasi OT, serta pelatihan, dalam tiga mode kesadaran situasional dan pengambilan keputusan.

Hal ini menjelaskan fakta bahwa sebagian besar sistem tenaga listrik modern dikendalikan secara otomatis, seperti pembangkitan, permintaan, dan penutupan kembali saluran udara serta skema perlindungan khusus. Tren otomatisasi ini diperkirakan akan terus berlanjut; pada akhirnya, semua elemen sistem tenaga listrik akan dikendalikan secara otomatis dalam beberapa bentuk, dan operator kemungkinan akan melakukan intervensi ketika otomatisasi terganggu, atau jika terjadi kejadian sistem besar dan keadaan darurat.

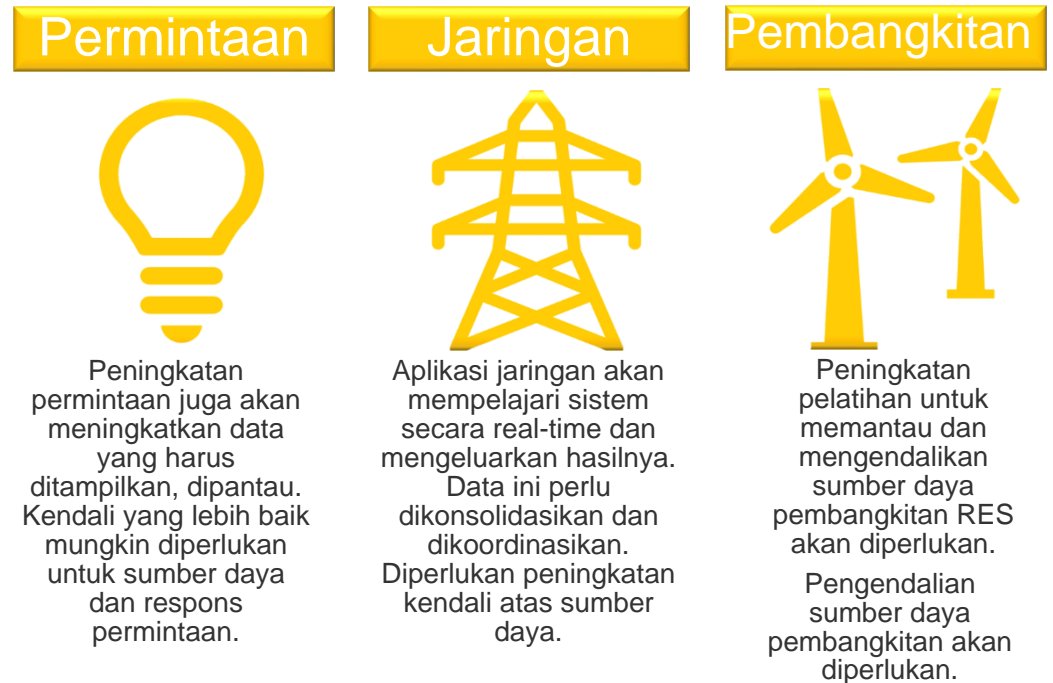
#### **Antarmuka Pengguna dan Desain Tampilan**

Operator memerlukan antarmuka aplikasi perangkat lunak yang disederhanakan dan dioptimalkan yang akan berinteraksi dengan mereka, dan informasi harus disajikan dalam format yang paling jelas, tidak ambigu, dan paling dapat ditindaklanjuti. Desain tampilan harus distandardisasi dan mengikuti pedoman praktik terbaik. Karena pusat kendali menampung sejumlah besar data streaming analog dan alarm dari berbagai alat, menyajikan data ini dengan jelas dan ringkas untuk meningkatkan kesadaran situasional adalah fokus utama panduan CCOTF ini.

Visi ideal CCOTF untuk optimalisasi faktor manusia adalah memiliki kendali otomatis penuh atas semua aset jaringan dan sumber daya pembangkitan, dan, jika memungkinkan, respons permintaan (melalui operator sistem distribusi). Operator umumnya akan merencanakan sistem berdasarkan prakiraan dan melakukan intervensi ketika otomatisasi tidak beroperasi dengan benar.

#### **Pendukung Keputusan**

Tangga keputusan yang dikembangkan oleh Jens Rasmussen pada tahun 1970-an (Gambar 15) adalah formulasi terbaik untuk pengambilan keputusan dan tindakan operator dalam konteks pengendalian. Tangga ini menekankan tiga mode pengambilan keputusan dan kesadaran situasional menggunakan kode warna berikut:



**Gambar 12. Pendorong utama perubahan**

- **Akuisisi dan analisis informasi**
- **Pendukung keputusan**
- **Implementasi tindakan pengendalian.**

Akuisisi informasi dan analisis informasi dapat dikelompokkan atau dipisahkan, jika diperlukan.

Dalam operasi pusat kendali, tiap kelas dalam setiap proses dapat diotomatiskan pada tingkat yang berbeda dan semuanya saling terkait. Misalnya, proses operasional seperti kendali tegangan mungkin memiliki otomatisasi informasi tingkat tinggi (SCADA), otomatisasi keputusan tingkat rendah (operator yang memutuskan), dan otomatisasi tindakan tingkat rendah (pengalihan perangkat kompensasi reaktif manual).

### **Pelatihan**

Operator harus sepenuhnya terlatih dan disertifikasi, dengan penyegaran pelatihan rutin serta pembaruan pada semua alat pusat kendali dan skenario intervensi. Operator harus mampu menilai risiko dengan percaya diri dan menjaga kesadaran situasional untuk menghindari efek penurunan kinerja. Efek penurunan kinerja adalah risiko umum dalam penerbangan ketika pilot menggunakan autopilot dan mereka mengalami penurunan kemampuan untuk melakukan intervensi ketika autopilot tidak berfungsi. Prosedur operasional baru harus dikembangkan setelah sistem utara dan selatan Sulawesi saling terhubung.

## **7.2 Nilai Pengembangan dan Peningkatan Faktor Manusia pada Operator dan Pendukung Keputusan**

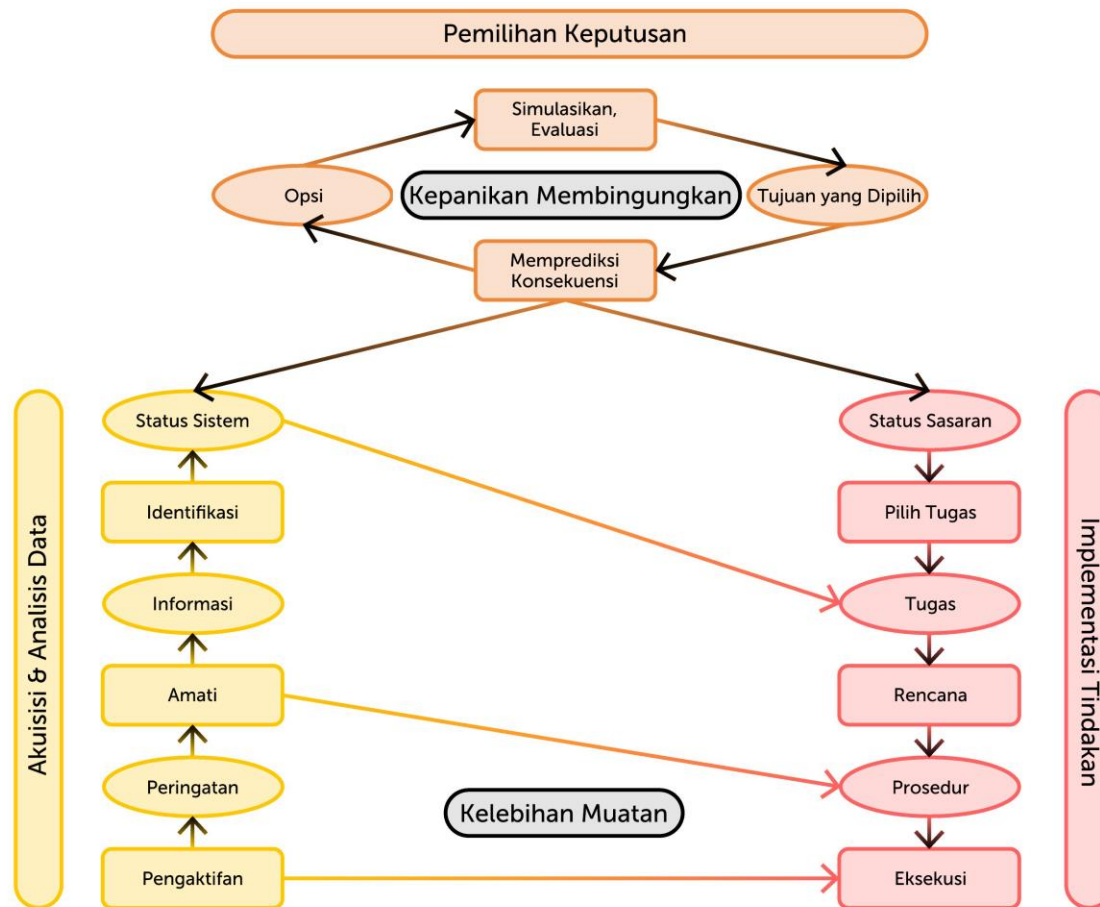
Pilar Faktor Manusia dan Pendukung Keputusan bagi operator di CCOTF akan menjadi faktor penentu keandalan dan akan bermanfaat bagi PLN dan Sulawesi. Peningkatan kesadaran situasional akan mengurangi kesalahan dalam sistem dan memastikan bahwa pemadaman listrik dapat dipulihkan sesegera mungkin. Hal ini harus dilengkapi dengan pelatihan yang disesuaikan dengan ORC (dibahas di Bagian 8).

Masalah sistem akan diidentifikasi dan dikategorikan secara proaktif sebelumnya, sehingga mengurangi kebutuhan akan tindakan operator.

Pengendalian sistem yang ditingkatkan, mulai dari pusat kendali hingga seluruh sumber daya, akan memastikan pasokan dipulihkan secepat mungkin dan daya disalurkan secara optimal dan ekonomis ke seluruh jaringan listrik.



**Gambar 13. Visi CCOTF ∞ Visi PLN**



Gambar 14. Tangga keputusan Rasmussen dengan tiga mode pengambilan keputusan operator

Sumber: EPRI

### 7.3 Panduan untuk Faktor Manusia dan Pendukung Keputusan

Tabel 3. Faktor Manusia dan Pendukung Keputusan

	Keadaan Saat Ini 2023	Kemungkinan tahun 2025	Ulasan 2027	Kemungkinan tahun 2030	Keadaan Masa Depan 2030+	Keadaan Visi
<b>Pelatihan</b>	Rasionalkan semua prosedur operasional ke dalam program pelatihan	Digitalisasi prosedur operasional dan materi pelatihan. Pelatihan tentang otomatisasi dan pengambilan keputusan.	Pengembangan ORC untuk memfasilitasi proses pelatihan dan sertifikasi baru.	Program pelatihan yang dapat disertifikasi pada semua alat OT di ORC.	Pelatihan tim multidomain dengan operator dari sistem PLN lainnya.	
<b>Pemantauan dan Visualisasi</b>	Layar dan tampilan berbeda dengan berbagai gaya dan filosofi	Filosofi antarmuka manusia-mesin dengan kode warna yang dirasionalisasi menjadi merah, oranye, dan kuning. Semua alat OT di pusat kendali memiliki visualisasi dan gaya yang konsisten.	Pengembangan dasbor di EMS baru dan alat IT lainnya untuk mendukung tindakan pemantauan, pengambilan keputusan, dan pengendalian	Pengambilan keputusan yang dipandu untuk semua alat.	Satu panel kaca untuk semua visualisasi – menggabungkan wawasan data dari berbagai aplikasi	Pengawas sistem otomatis, dengan dukungan keputusan terpandu. Dilatih seputar simulator realistik di ORC.
<b>Kognisi dan Pengambilan Keputusan</b>	Kekurangan staf untuk stasiun induk SCADA. Prosedur operasi standar manual mengandalkan pengetahuan dan kompetensi/pengalaman pribadi.	Opsi diidentifikasi untuk semua proses operasional dan mudah diakses. Dasbor pendukung keputusan yang ditingkatkan.	Kerangka kerja penilaian risiko dengan simulasi dan opsi.	Simulasi otomatis, pertimbangan mendalam pada opsi, dan optimalisasi untuk semua proses operasional.	Proses otomatis untuk informasi, dukungan keputusan, dan tindakan pengendalian dengan metrik kepercayaan dan keyakinan.	

## 8 Panduan Fasilitas dan Peralatan CCOTF

### 8.1 Pendorong Perubahan dan Visi CCOTF

PLN akan mengembangkan pusat kendali tunggal baru untuk mengoperasikan jaringan Sulawesi yang saling terhubung, dengan pusat kendali cadangan pemulihan bencana. Ini adalah proyek bermodal besar dan akan menghabiskan sumber daya perencanaan, desain, dan pengembangan pada tahun-tahun mendatang. Penting untuk merancang dan membeli peralatan canggih untuk pusat kendali, karena pusat kendali adalah aset yang akan digunakan selama puluhan tahun, sehingga peralatan tersebut diperkirakan akan tetap dapat digunakan selama bertahun-tahun. Visi CCOTF berfokus pada desain fasilitas dan peralatan inovatif untuk item seperti tampilan dan konsol kerja yang dapat meningkatkan kesadaran situasional dan meningkatkan efektivitas staf melalui ergonomi.

### 8.2 Nilai Pengembangan dan Peningkatan Sarana dan Peralatan Pusat Kendali

Keandalan dan ketahanan dalam pengoperasian pusat kendali sangat penting. Dalam beberapa tahun terakhir, kita telah melihat pentingnya kesinambungan operasional dalam menghadapi pandemi dan peristiwa iklim besar, dan kita mungkin akan melihat fokus yang berkelanjutan dari masyarakat dan pembuat kebijakan pada tahun-tahun mendatang. Banyak pusat kendali di seluruh dunia beroperasi dengan fasilitas cadangan utama atau aktif ganda dan membagi tim operator mereka menjadi kelompok terpisah yang bekerja secara independen. Memiliki cadangan utama dan aktif yang dapat digunakan dengan mudah ketika terjadi keadaan darurat sangat penting bagi ketahanan jaringan Sulawesi.

Memanfaatkan peralatan ergonomis terancang bagi operator memiliki manfaat tambahan yaitu memastikan kesehatan mereka terlindungi dan risiko cedera berkurang. Mengembangkan fasilitas dan ruang operasional dengan mempertimbangkan operasi 24/7/365 juga akan membantu menciptakan lingkungan kerja yang lebih menyenangkan, yang akan mengurangi kelelahan operator, meningkatkan semangat kerja, dan mendukung perekrutan. Direkomendasikan agar pendekatan ergonomis baru diuji di ORC sebelum diterapkan di pusat kendali real-time. Untuk CCOTF direkomendasikan agar pembaruan dilakukan berdasarkan standar ISO 11064 untuk pusat kendali.

#### Permintaan



Teknologi baru dan visualisasi data untuk peningkatan permintaan secara besar-besaran.

#### Jaringan



Teknologi baru untuk memvisualisasikan sistem secara real-time dan berinteraksi dengan alat pusat kendali. Simulator baru untuk alat pusat kendali. Pusat kendali harus aman.

#### Pembangkitan



Sumber daya baru perlu diintegrasikan ke dalam sistem pasar dan pusat kendali serta dipantau menggunakan teknologi baru.

**Gambar 15. Pendorong utama perubahan**



### ***Pusat Kesiapan Operasional***

Untuk mewujudkan visi dan ambisi PLN dan CCOTF, keluaran alat pusat kendali memerlukan lingkungan simulator untuk pengujian dan memfasilitasi pelatihan operator. Saat ini PLN memiliki simulator pelatihan tetapi belum memiliki lingkungan pengujian.

Dalam visi CCOTF, semua aplikasi perangkat lunak harus memiliki lingkungan simulator dengan model sistem asli (kembaran digital). Fasilitas simulator pelatihan operator harus ditingkatkan menjadi ORC untuk:

- Pengujian penerimaan pengguna terhadap alat perangkat lunak
- Pelatihan dengan prapenerapan alat baru oleh operator (misalnya EMS)
- Menguji desain antarmuka pengguna baru
- Menguji perangkat keras baru dan inovasi
- Menyediakan fungsi inti operator pelatihan dan pengujian
- Lingkungan simulator penelitian real-time untuk alat pusat kendali
- Fasilitas pusat kendali cadangan potensial dalam keadaan darurat.

Semua ambisi panduan CCOTF tidak akan dapat dicapai tanpa lingkungan simulator yang efektif untuk menguji alat dan teknologi baru serta melatih operator masa depan.



**Gambar 16. Visi CROF ∞ Visi PLN**

### 8.3 Panduan untuk Fasilitas dan Peralatan CCOTF

Tabel 4. Fasilitas dan Peralatan

	Keadaan Saat Ini 2023	Kemungkinan tahun 2025	Ulasan 2027	Kemungkinan tahun 2030	Keadaan Masa Depan 2030+	Keadaan Visi
<b>Fasilitas Gedung</b>	Pusat kendali terpisah.	Pusat kendali terintegrasi dengan pusat kendali pemulihan bencana ekstra lengkap agar dapat sering beroperasi secara bergantian (atau konfigurasi aktif/lokasi aktif).	Pusat kendali utama dan cadangan yang saling terhubung dengan tautan video yang aman.	Integrasi yang mulus antara pusat kendali aktif dan ORC dengan lingkungan yang konsisten di semua lokasi.	Pusat kendali virtual yang aman untuk proses operasional tertentu.	Ruang kerja digital dan ergonomis di lingkungan yang menyenangkan dengan ORC multifungsi untuk pelatihan dan simulasi.
<b>Peralatan Pusat Kendali</b>	Peralatan pusat kendali standar.	Layar visualisasi level 1, 2, 3 untuk kesadaran situasional.	Pusat kendali digital tanpa kertas.	Interaktivitas kendali suara dengan sistem IT/OT.	Kombinasi antara realitas dan interaksi gestur untuk pemantauan dan pengendalian.	
<b>ORC</b>	Simulator yang berdiri sendiri untuk pelatihan skenario.	Desain dan penerapan fasilitas pelatihan baru di pusat kendali baru.	Sandbox ORC untuk pengujian aplikasi baru. ORC dapat bertindak sebagai fasilitas pusat kendali cadangan.	Semua aplikasi OT memiliki lingkungan pengujian untuk diterapkan di ORC untuk pelatihan semua alat.	Simulator digital real-time bagi ORC untuk meniru respons dinamis jaringan.	

## 9 Pertimbangan Masa Depan

Tabel di bawah ini menyoroti bidang-bidang yang memerlukan pertimbangan khusus untuk meningkatkan sistem Sulawesi, khususnya selama proses pengadaan pusat kendali jangka pendek.

**Tabel 5. Pertimbangan Masa Depan untuk Meningkatkan Sistem Sulawesi**

Topik	Konteks dan Pertimbangan Masa Depan
<p style="text-align: center;"><b>AGC</b></p>	<p>AGC saat ini belum sepenuhnya diterapkan sehingga memerlukan kendali manual terhadap unit pembangkit.</p> <p>AGC menawarkan serangkaian manfaat yang dapat menghasilkan penghematan biaya yang signifikan dengan mengurangi waktu henti, hilangnya produktivitas, dan pendapatan, termasuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengurangi konsumsi bahan bakar dan biaya pengoperasian melalui optimalisasi keluaran generator</li> <li>• Peningkatan efisiensi sistem melalui pengurangan kerugian transmisi dan distribusi serta menghilangkan kebutuhan akan pembangkitan cadangan</li> <li>• Optimalisasi sumber daya, khususnya untuk RES yang bervariasi</li> <li>• Peningkatan keandalan melalui respons cepat terhadap perubahan permintaan, mengurangi risiko pemadaman listrik total atau sebagian.</li> </ul> <p>Pertimbangan masa depan harus mencakup potensi untuk mengintegrasikan kemampuan AGC, dukungan komunikasi yang tepat, protokol dan pelatihan operasional terkait, dan aktivasi pengendali utama secara gratis.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Pemodelan dan Penelitian Sementara</b></p>	<p>Pemodelan sementara dan penelitian terkait tidak diintegrasikan dengan memadai ke dalam perencanaan.</p> <p>Pertimbangan masa depan harus mencakup potensi penerapan alat dan penelitian pemodelan sementara yang mampu menilai karakteristik dinamis, dan mengintegrasikannya ke dalam langkah-langkah perencanaan. Ini adalah kemampuan yang sangat penting untuk memastikan stabilitas sistem dan harus diselidiki sesegera mungkin, karena diperlukan waktu yang lama (bertahun-tahun) untuk mencapai titik stabil.</p>

<b>Layanan Tambahan</b>	<p>Layanan tambahan saat ini tidak dimanfaatkan. Layanan ini dapat memberikan manfaat penting untuk mengelola variabilitas dan ketidakpastian.</p> <p>Pertimbangan masa depan harus mencakup potensi untuk menyelidiki mekanisme integrasi layanan tambahan ke dalam operasi untuk mendukung stabilitas.</p>
<b>Data Distribusi</b>	<p>Data sebaran yang terperinci tidak dinilai pada tingkat transmisi; data tersebut dapat mendukung maksimalisasi efisiensi dan stabilitas sistem, misalnya untuk mendukung pemanfaatan yang solid atas sumber daya energi terdistribusi dan manajemen sisi permintaan.</p> <p>Pertimbangan masa depan harus mencakup potensi penerapan pemodelan sumber daya energi terdistribusi dan gabungan pengawasan. Lihat pedoman NERC yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan PLN:  <a href="https://www.nerc.com/comm/RSTC_Reliability_Guidelines/DERStudyReport.pdf">https://www.nerc.com/comm/RSTC_Reliability_Guidelines/DERStudyReport.pdf</a>.</p>
<b>Konsistensi Model Antara Alat dan Aplikasi</b>	<p>Pertimbangan masa depan harus mencakup potensi untuk menggabungkan model terpadu untuk semua alat dan aplikasi guna memastikan interoperabilitas alat tersebut.</p>
<b>Validasi Model</b>	<p>Pertimbangan masa depan harus mencakup potensi untuk meningkatkan kemampuan validasi model. NERC memiliki beberapa rekomendasi dasar untuk aliran daya dan validasi model dinamis yang dapat berfungsi sebagai titik awal:  <a href="https://www.nerc.com/comm/PC/Model%20Validation%20Working%20Group%20MVWG%202013/NERC_Model_Validasi_Prosedur_v3.pdf">https://www.nerc.com/comm/PC/Model%20Validation%20Working%20Group%20MVWG%202013/NERC_Model_Validasi_Prosedur_v3.pdf</a>.</p> <p>Pertimbangkan juga penerapan prosedur pengujian berulang yang difasilitasi dengan PMU atau perangkat pemantauan gangguan resolusi tinggi lainnya untuk memastikan bahwa respons yang dimodelkan terhadap kejadian sistem sesuai dengan respons sebenarnya dari sistem.</p>
<b>Pengarsipan</b>	<p>Pertimbangan masa depan harus mencakup potensi penerapan kemampuan pengarsipan data yang lebih kuat, seperti OSI PI.</p>
<b>Pemodelan Biaya Produksi dan Distribusi Ekonomis</b>	<p>Saat ini, kemampuan pemodelan biaya produksi yang terbatas mengakibatkan kesenjangan antara pemodelan yang efektif dan distribusi ekonomis. Pertimbangan masa depan harus mencakup potensi untuk mengintegrasikan pemodelan biaya produksi dan alat serta kemampuan ekonomis ke dalam perencanaan dan pengambilan keputusan operasional untuk meningkatkan operasi yang ekonomis.</p>

<b>Target Kendali</b>	Manajemen target adalah alat kendali AGC dan tegangan yang penting. Pertimbangan masa depan harus mencakup potensi untuk menyelidiki dan menerapkan target bagi sumber daya utama, termasuk sumber daya berbasis inverter, serta daya aktif dan reaktif.
<b>Manajemen Alarm</b>	Pertimbangan masa depan harus mencakup potensi untuk menerapkan pendekatan standar terhadap manajemen alarm dengan kategorisasi filosofi dan struktur standar untuk alarm dan titik data dalam sistem tenaga listrik untuk memungkinkan analitik kecerdasan buatan/pembelajaran mesin, penanganan alarm cerdas, analisis akar masalah, dan pemantauan kesehatan aset.
<b>Pelatihan Pemulihan</b>	Pertimbangan masa depan harus mencakup potensi penerapan latihan pemulihan sistem/black-start secara teratur berdasarkan simulasi pelatihan petugas distribusi.
<b>Komunikasi</b>	Pertimbangan masa depan harus mencakup potensi penerapan mekanisme untuk memastikan unit/gerbang terminal jarak jauh memiliki kemampuan komunikasi dengan banyak node master dan protokol, dan bahwa kemampuan komunikasi antara Pusat Kendali Sulawesi dan DRC menggunakan protokol komunikasi di antara pusat kendali. Pertimbangkan tinjauan relevansi struktur data telekomunikasi seperti yang dijelaskan dalam kode jaringan.
<b>Data Cuaca</b>	Pertimbangan masa depan harus mencakup potensi integrasi peralatan sensor cuaca untuk pengelolaan sumber pembangkitan variabel.
<b>SCADA</b>	Pertimbangan masa depan harus mencakup potensi penerapan desain arsitektur SCADA yang bersertifikasi keamanan siber/tahan intrusi dan mengintegrasikan WAMS/WAMPS ke dalam SCADA.
<b>Organisasi Staf</b>	Berdasarkan diskusi staf PLN, pertimbangan masa depan dapat mencakup potensi untuk menyelidiki berbagai pilihan untuk menyelaraskan kembali hierarki organisasi pusat kendali dan kepegawaian untuk memfasilitasi operasi yang efisien.
<b>Penaksir Status</b>	Penaksir status adalah alat penting untuk menginformasikan alat observasi dan pengelolaan sistem lainnya. Pertimbangan masa depan harus mencakup potensi penerapan protokol untuk menjalankan penaksir status dengan lebih sering (detik) guna meningkatkan ketepatan alat lainnya; pertimbangkan pula untuk memperbarui penaksir status agar memungkinkan dilakukannya pengukuran hibrida untuk unit terminal jarak jauh dan PMU yang akan meningkatkan kualitas analitik.