

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Yang Relevan

Untuk memudahkan tugas akhir ini, terdapat beberapa referensi yang dapat digunakan untuk melengkapi penelitian, antara lain :

1. M.T. Takci et al., (2025). “*Data centres as a source of flexibility for power systems*”. Jurnal ini membahas tentang model pemanfaatan baterai/UPS di data center sebagai sumber fleksibilitas (mis. pelepasan/penyimpanan energi, dukungan frekuensi), termasuk aspek ekonomi dan operasional — sangat relevan jika analisis UPS melibatkan penggunaan ganda (*backup + energy-shifting*) [5].
2. Y. Wang et al., *The Innovation* (2024). “*Data center integrated energy system for sustainability*”. Kajian menyeluruh DC-IES (*integrated energy systems*) termasuk peran UPS/BESS dalam integrasi energi terbarukan, pengelolaan beban dan kontinuitas daya. Berguna untuk menempatkan analisis performa UPS dalam konteks sistem energi yang lebih besar [2].
3. Nuga Pratama, Bagus Dwi Cahyono, (2022). “Implementasi UPS (*Uninterruptible Power Supply*) Sebagai Backup Daya Cadangan Di PT. ASDP Indonesia Ferry”. Jurnal ini membahas tentang bagaimana UPS digunakan sebagai backup di perusahaan, menganalisis kestabilan dan proteksi terhadap gangguan listrik [7].
4. Try Edo Saputra, Yosi Apriani, Muhammad Hurairah, (2021). “UPS (*Uninterruptible Power Supply*) 1000 Watt Berbasis Panel Surya”. Jurnal ini berfokus pada strategi perawatan preventif UPS: inspeksi baterai, pemeriksaan komponen, manajemen termal. Tujuannya meningkatkan keandalan dan meminimalkan waktu downtime.
5. Nomon Muranto, Atmam, Zulfahri, (2018). “Studi Peralihan Daya Listrik Dari PLN ke Generator Set (Genset) Ketika Terjadi Pemadaman Dari PLN Dengan *Uninterruptible Power Supply* (UPS) Pada Hotelgrand Elite Pekanbaru”. Jurnal ini membahas tentang sistem pergantian daya dari PLN ke genset dengan UPS sebagai penyangga transien. Menghitung kebutuhan kapasitas UPS berdasarkan beban emergency [6].

6. Muhamad Anugrah Akbar Azhar, Aldo Lorenza (2021), “*Analyses Sistem Kerja UPS (Uninterruptible Power Supply) Power Scale 200 kVA Terminal Bandara PT. Angkasa Pura II (Persero)*”. Jurnal ini berfokus pada pembahasan mengenai berapa lama UPS dapat mencadangkan beban Terminal Bandara tanpa generator darurat, yang dilakukan dengan menggunakan metode observasi lapangan. Hasil pengamatan di lapangan didapatkan bahwa dengan menggunakan UPS yaitu tingkat efisiensi UPS AC - AC di Terminal Bandara sebesar 95%, artinya semakin besar daya yang dapat disediakan oleh sumber daya Terminal Bandara, hal ini memungkinkan penghematan energi yang signifikan dalam setiap pekerjaan yang dilakukan di bandara [1].

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Data Center

Data center merupakan fasilitas terpusat yang digunakan untuk menempatkan server, perangkat jaringan, media penyimpanan, serta infrastruktur pendukung seperti sistem pendingin dan kelistrikan. Data center dirancang agar memiliki tingkat keandalan tinggi guna menjamin keberlangsungan layanan teknologi informasi [3], [4].

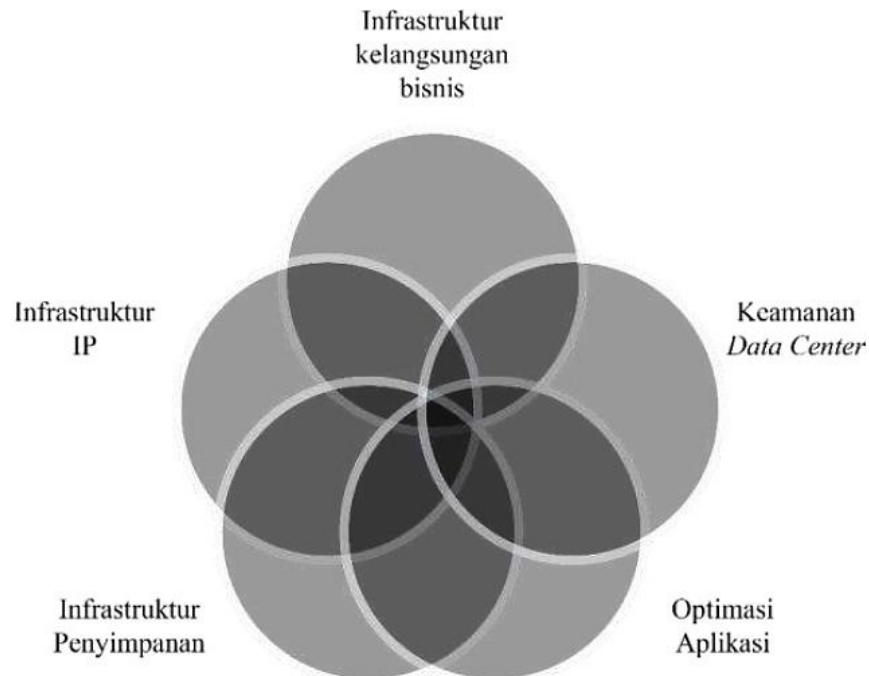
Keandalan data center sangat dipengaruhi oleh kualitas sistem catu daya, khususnya sistem UPS dan baterai sebagai cadangan daya saat terjadi gangguan suplai dari jaringan utama [6], [7].

Berdasarkan salah satu buku standardisasi untuk data center yang dikeluarkan *Telecommunications Industry Association* (TIA-942), definisi data center merupakan sebuah bangunan atau bagian dari suatu bangunan untuk menempatkan ruang komputer dan area-area lain sebagai pendukungnya. Fungsi utamanya adalah mengkonsolidasi dan memusatkan seluruh sumber daya teknologi informasi, tempat dari operasional jaringan, sebagai fasilitas untuk bisnis elektronik, dan juga untuk memberikan layanan untuk operasi pengolahan data yang penting.

1. Layanan Utama Data Center

Ada beberapa layanan utama yang secara umum merupakan keluaran dari data center yang digambarkan pada Gambar 2.1, yaitu: *Business continuance infrastructure*,

data center security infrastructure, application optimization, IP infrastructure, dan storage infrastructure [3].



Gambar 2.1 Layanan Utama Data Center

Sumber : Jurnal Azie et al., 2017

2. Kriteria Data Center

Data center dibangun karena memiliki tujuan yang harus dicapai, yaitu terpenuhinya kriteria-kriteria pada data center, yaitu *Availability, Flexibility and Scalability*, dan *Security* [3], [4].

Data center fasilitas yang menyimpan dan memproses layanan digital kritikal (*cloud, perbankan, e-commerce*). Karena sifatnya *mission-critical*, data center memerlukan ketersediaan listrik tinggi; gangguan kecil dapat menyebabkan *downtime* besar dan kerugian operasional. Oleh sebab itu desain infrastruktur listrik data center menekankan redundansi, monitoring, dan strategi kontinuitas [2], [3].

3. Standar Tiering Data Center

Berdasarkan standar TIA-942, data center diklasifikasikan menjadi empat tier, yaitu Tier I sampai Tier IV, yang mencerminkan tingkat redundansi dan keandalan infrastruktur [3], [4].

Tier Karakteristik :

- **Tier I - *Basic Site Infrastructure***

Infrastruktur dasar dengan satu jalur distribusi non-redundansi. Waktu aktif (*uptime*) sekitar 99,671% per tahun. Toleransi waktu henti maksimum adalah 28 jam per tahun. Biasanya digunakan oleh perusahaan yang memiliki pusat data internal. UPS digunakan sebagai alat cadangan.

- **Tier II - *Redundant Site Infrastructure Capacity Components***

Mirip dengan Tier 1, tetapi dengan tambahan komponen redundan. Dilengkapi dengan generator cadangan untuk mengatasi pemadaman listrik. Waktu operasional sekitar 99,741% per tahun. Toleransi waktu henti maksimum adalah 22 jam per tahun. Memiliki lantai yang ditinggikan untuk mengatur kabel dan pendingin udara.

- **Tier III - *Concurrently Maintainable Site Infrastructure***

Standar internasional dengan infrastruktur dan fasilitas lengkap. Dilengkapi dengan lebih dari satu sumber daya listrik dan jaringan. Waktu operasional sekitar 99,982% per tahun. Toleransi waktu henti maksimum adalah 1,6 jam per tahun. Sistem keamanan 24 jam dan tidak rentan terhadap bencana.

- **Tier IV - *Fault Tolerant Site Infrastructure***

Hampir sama dengan Tier 3, tetapi dengan toleransi waktu henti hanya 30 menit per tahun. Waktu operasional sekitar 99,995% per tahun. Memiliki komponen redundansi N+1 dan daya cadangan. Dilengkapi dengan sistem saluran untuk pembuangan udara panas dan dingin. Sangat aman dan tidak rentan terhadap gangguan yang direncanakan maupun tidak direncanakan.

2.2.2 Electrical Equipment Pada Data Center

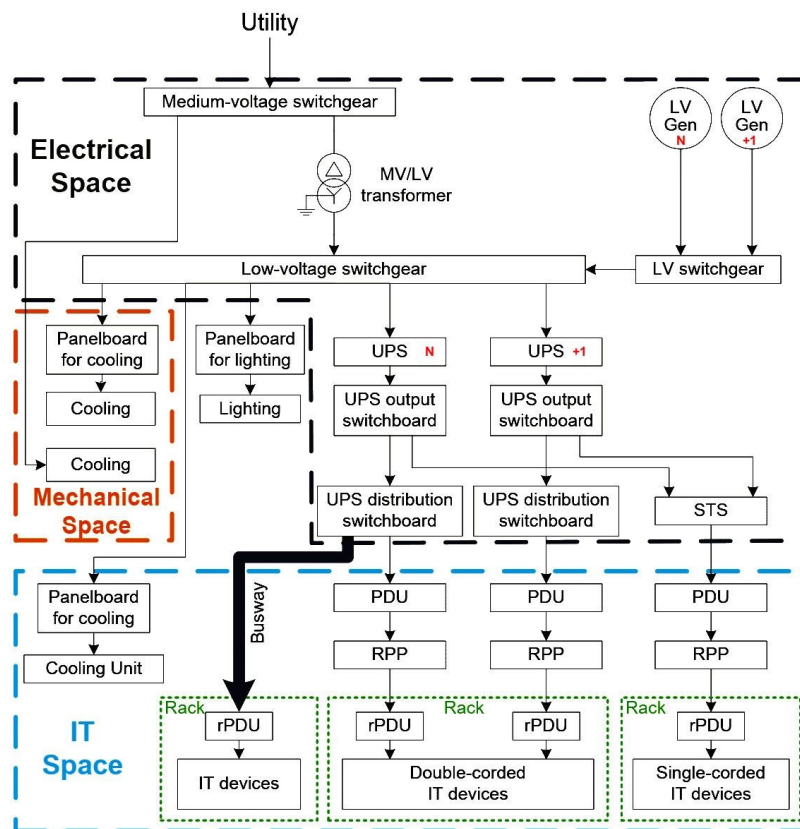
Sistem kelistrikan di data center dirancang dengan prinsip *reliability* (keandalan), *redundancy*, dan *maintainability* (mudah dirawat) [3]. Sistem kelistrikan data center terdiri dari suplai PLN, panel distribusi, UPS, dan generator set. UPS berfungsi sebagai

pengaman utama ketika terjadi pemadaman PLN, sementara generator set digunakan sebagai suplai daya jangka panjang [6].

Implementasi UPS sebagai backup daya telah terbukti mampu menjaga kontinuitas layanan pada fasilitas perhotelan dan industri [6], [7]. Berikut penjelasan dari beberapa equipment utama :

2.2.2.1 Incoming Power Supply

Sumber utama daya untuk data center berasal dari jaringan listrik PLN atau pembangkit internal. Daya masuk ke data center melalui *switchgear* tegangan menengah (*MV switchgear*) sebelum diturunkan oleh transformator. *Power supply* ini berfungsi untuk menyediakan pasokan listrik primer untuk seluruh peralatan.



Gambar 2.2 Single Line Diagram (SLD) Data Center

Sumber : [https://1.bp.blogspot.com/-G14lPyPx9Zg/XmnpMr0-](https://1.bp.blogspot.com/-G14lPyPx9Zg/XmnpMr0-W_I/AAAAAAAAABzk/py7H8wIz93wqa64OiDsu32Ho_X2R3g7lwCLcBGAsYHQ/s1600/data-center-block-diagram-p.jpg)

[W_I/AAAAAAAAABzk/py7H8wIz93wqa64OiDsu32Ho_X2R3g7lwCLcBGAsYHQ/s1600/data-center-block-diagram-p.jpg](https://1.bp.blogspot.com/-G14lPyPx9Zg/XmnpMr0-W_I/AAAAAAAAABzk/py7H8wIz93wqa64OiDsu32Ho_X2R3g7lwCLcBGAsYHQ/s1600/data-center-block-diagram-p.jpg)

2.2.2.2 Transformer (Trafo)

Transformer atau trafo, pada data center adalah perangkat listrik yang berfungsi untuk mengubah tegangan listrik dari satu level ke level lain (misalnya dari tegangan tinggi ke tegangan rendah), agar sesuai dengan kebutuhan operasional perangkat-perangkat IT, sistem pendingin, dan sistem pendukung lainnya di dalam data center. Transformer (trafo) pada data center komponen vital yang berfungsi untuk :

1. Mengubah Tegangan Listrik

Transformer berfungsi untuk mengubah tegangan listrik dari sumber (umumnya PLN) agar sesuai dengan kebutuhan operasional perangkat di data center.

- *Step-down Transformer*: menurunkan tegangan tinggi (misal 20 kV atau 6.6 kV dari PLN) ke tegangan menengah/rendah (400/230 V) untuk digunakan oleh UPS, server, pendingin, dan perangkat IT lainnya.
- *Step-up Transformer* (lebih jarang) digunakan bila sistem distribusi memerlukan tegangan lebih tinggi untuk efisiensi distribusi daya di area luas.

2. Menjadi Bagian Sistem Distribusi Tenaga

Transformer bagian dari *Power Distribution Unit (PDU)* dan *Main Distribution Board (MDB)* di data center.

- Biasanya terdapat *transformer* utama (utama + cadangan) di panel *incoming*.
- Tegangan diturunkan dan didistribusikan ke UPS, panel-panel distribusi dan *rack server*.

3. Menyediakan Isolasi dan Keamanan

- Memberikan isolasi listrik antara PLN dan beban internal (perangkat IT).
- Mengurangi risiko gangguan dan arus bocor masuk ke internal.
- Kadang digunakan *isolation transformer* secara khusus untuk keamanan peralatan sensitif.

4. Mendukung Redundansi dan Keandalan

- Data center umumnya menggunakan konfigurasi redundan (N+1, 2N) pada daya, termasuk transformer.
- Misalnya: 2 *transformer* dari dua sumber listrik berbeda (PLN dan genset) — meningkatkan *availability* dan mengurangi *single point of failure*.

Jenis trafo yang umum digunakan di data *center* adalah *oil-filled transformer* dan *Dry-type transformer (cast resin)*.



Gambar 2.3 Trafo Basah

Sumber : <https://www.rotaxltd.com/wp-content/uploads/2023/06/Trafindo-%E2%80%93-Oil-Immersed-Transformers.jpg>

Oil-filled transformer atau trafo basah menggunakan minyak isolasi sebagai media pendingin dan isolasi listrik, sehingga mampu menangani kapasitas daya yang lebih besar dengan efisiensi pendinginan yang lebih baik. Transformator jenis ini umumnya digunakan pada sisi *incoming utility* atau gardu utama data *center*, terutama untuk aplikasi dengan rating MVA tinggi. Namun, karena adanya risiko kebocoran minyak dan kebakaran, *oil-filled transformer* biasanya ditempatkan di area terpisah atau outdoor, serta memerlukan sistem proteksi kebakaran dan perawatan rutin seperti pengujian kualitas minyak. Oleh karena itu, meskipun sangat andal untuk beban besar, penggunaannya di dalam bangunan utama data center dibatasi demi alasan keselamatan.



Gambar 2.4 Trafo Kering

Sumber: <https://image1ws.indotrading.com/s3/productimages/webp/co3534/p811983/w600-h600/6c7149aa-a2e1-4687-b603-65eff469a707.png>

Dry-type transformer (cast resin) atau trafo kering merupakan jenis transformator yang paling umum digunakan di data *center* karena tidak menggunakan minyak sebagai media isolasi maupun pendingin. Belitan transformator dilapisi *resin epoxy* sehingga terlindung dari kelembapan, debu, dan kontaminasi lingkungan. Karakteristik ini membuat *dry-type transformer* sangat aman untuk instalasi indoor, terutama di area dekat peralatan IT, UPS, dan PDU. Risiko kebakaran yang sangat rendah, kebutuhan perawatan minimal, serta kemampuan menangani beban *non-linear* dari server menjadikannya pilihan utama untuk sistem distribusi listrik internal data *center*, meskipun ukurannya relatif lebih besar dan biaya awalnya lebih tinggi dibandingkan jenis *oil-filled*.

2.2.2.3 Main Distribution Panel (MDP) & Sub Distribution Panel (SDP)

MDP menerima daya dari trafo, lalu mendistribusikannya ke UPS, panel HVAC, *lighting*, *fire system*, dll. Panel dilengkapi dengan *circuit breaker*, MCCB, relai proteksi yang berfungsi untuk pengendali utama distribusi daya dan proteksi.

2.2.2.4 Generator Set (Genset)

Generator Set (Genset) pada data *center* adalah sistem pembangkit listrik cadangan berbasis mesin diesel atau gas yang berfungsi untuk menjaga kontinuitas daya ketika pasokan listrik utama (PLN/grid) mengalami gangguan atau pemadaman. Dilengkapi dengan *Automatic Transfer Switch* (ATS) untuk perpindahan otomatis dari PLN ke genset. Genset adalah bagian krusial dari sistem *power backup tiered*, bersama dengan UPS dan baterai. Adapun cara kerja genset pada data *center* adalah saat data *center* beroperasi dalam kondisi normal, seluruh kebutuhan listrik disuplai oleh jaringan listrik utama, yaitu dari PLN atau sumber *grid* lainnya. Dalam keadaan ini, genset berada dalam posisi siaga (*standby*) dan tidak menyuplai daya. Namun, sistem kontrol genset tetap aktif dan terus memantau status listrik dari PLN secara otomatis.



Gambar 2.5 Generator Set (Genset)

Sumber: https://www.cummins.com/sites/default/files/styles/product_hero_788x526/public/2021-03/C2750D5B%20%282%29.webp?itok=D8QK14JJ

Ketika terjadi pemadaman listrik atau gangguan pada pasokan utama, sistem akan mendeteksi hilangnya tegangan secara otomatis. Pada saat yang sama, UPS (*Uninterruptible Power Supply*) akan langsung mengambil alih pasokan listrik tanpa jeda (0 detik), memastikan bahwa perangkat IT di data *center* seperti server, storage, dan jaringan tetap menyala tanpa gangguan. Setelah itu, dalam waktu sekitar 5 hingga 15 detik, genset akan otomatis menyala melalui sistem starter yang dikendalikan panel kontrol. Mesin genset akan mulai berputar dan menghasilkan listrik. Begitu output dari genset sudah stabil, sistem akan mengalihkan sumber daya dari UPS ke genset. Genset kemudian menjadi penyedia utama listrik untuk seluruh beban di data *center* selama pasokan dari PLN belum pulih.

Selama genset bekerja, sistem pemantauan akan terus mengawasi parameter penting seperti tegangan, arus, suhu mesin, dan level bahan bakar. Genset bisa terus beroperasi dalam durasi panjang, selama persediaan bahan bakarnya mencukupi.

Setelah listrik dari PLN kembali normal dan stabil, sistem akan otomatis mendeteksi pemulihan tersebut. Beban listrik kemudian dialihkan kembali dari genset ke pasokan utama PLN secara aman. Genset tidak langsung dimatikan, melainkan akan memasuki proses pendinginan otomatis (*cool down*) selama beberapa menit sebelum benar-benar berhenti. Setelah itu, genset kembali ke mode siaga, siap untuk digunakan lagi jika terjadi gangguan berikutnya.

2.2.3 *Uninterruptible Power Supply* (UPS)

Uninterruptible Power Supply (UPS) merupakan perangkat sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk menyediakan suplai daya cadangan secara kontinu kepada beban ketika terjadi gangguan atau pemadaman dari sumber utama. Keberadaan UPS menjadi sangat penting terutama pada sistem dengan beban kritis seperti data *center*, sistem telekomunikasi, fasilitas industri, dan infrastruktur pelayanan publik, di mana gangguan daya listrik dapat menyebabkan kerugian teknis maupun operasional [1], [6], [7].



Gambar 2.6 *Uninterruptible Power Supply (UPS)*

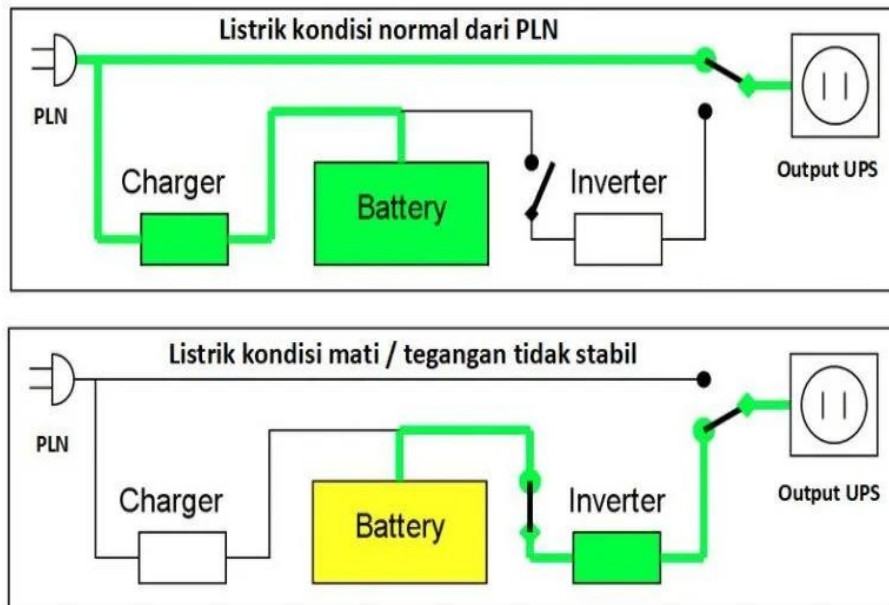
Sumber : <https://nps-power.com/wp-content/uploads/2024/09/Vertiv-Liebert-UPS-1536x1054.jpg>

UPS merupakan komponen vital dalam sistem kelistrikan data *center*. Berdasarkan standar IEC 62040-3, UPS tipe VFI (*Voltage and Frequency Independent*) mampu menjaga kestabilan tegangan dan frekuensi output secara independen terhadap kondisi input [11].

UPS berfungsi sebagai jembatan antara pemadaman PLN dan suplai generator set sehingga tidak terjadi gangguan pada peralatan IT [6], [7]. Secara umum, UPS berfungsi untuk menjaga kontinuitas suplai daya sekaligus meningkatkan kualitas daya listrik yang disalurkan ke beban. UPS mampu melindungi peralatan dari gangguan seperti fluktuasi tegangan, distorsi harmonik, *noise*, serta ketidakstabilan frekuensi yang berasal dari jaringan listrik [1], [11].

UPS dirangkaikan dengan peralatan seperti komputer pribadi, komputer pusat data, alat-alat kesehatan, alat-alat industri dan berbagai alat lain yang dijaga agar tetap berfungsi sementara saat pasokan listrik ke alat tiba-tiba terputus. Suplai daya alternatif dari UPS berasal dari baterai yang ada di

dalamnya, sehingga pada umumnya hanya berfungsi selama beberapa menit saja tergantung dari jenis dan spesifikasi masing-masing UPS serta beban yang terhubung dengannya. Saat aliran listrik utama yang melalui UPS terputus, sistem dalam UPS akan menggunakan energi yang tersimpan dalam baterai tersebut untuk mensuplai energi ke beban.



Gambar 2.7 Sistem Kerja UPS

Sumber : <https://panduanteknisi.com/wp-content/uploads/2018/03/Cara-kerja-UPS-listrik-normal-768x217.jpg.webp>

Sistem kerja UPS ketika kondisi normal, arus listrik dari PLN (AC power) langsung dialirkan ke peralatan (beban) melalui saklar. Kemudian melakukan proses *charger* yang berfungsi untuk mengisi baterai sambil listrik tetap menyuplai beban. Sedangkan pada Inverter dalam kondisi *standby* dan tidak aktif karena listrik utama tersedia. Dan Ketika ada terjadi gangguan maka baterai tetap terisi penuh untuk digunakan. Tetapi jika terjadi pemadaman, tegangan terlalu rendah (*undervoltage*), atau terlalu tinggi (*overvoltage*), listrik PLN terputus. Maka saklar otomatis berpindah (*transfer switch*). Dan baterai sekarang menjadi sumber daya utama untuk transfer daya ke inverter. Inverter aktif yang berfungsi untuk mengubah daya DC dari baterai menjadi AC untuk menyuplai peralatan (beban). Berikut gambar system kerja pada UPS.

UPS ini juga merupakan perangkat elektronik yang dapat melindungi segala jenis peralatan elektronik yang rentan terhadap ketidakstabilan arus atau tegangan. Baterai,

inverter, relay, sensor arus, sensor tegangan, detektor tegangan dan mikrokontroler yang sudah memiliki fitur *wifi* merupakan komponen yang membentuk UPS.



Gambar 2.8 Baterai UPS

Sumber : <https://solusibattery.com/wp-content/uploads/2021/06/Copy-of-PUFF-3.pg>

Baterai merupakan sebuah akumulator sel listrik yang dimana didalamnya terjadi proses elektrokimia yang *reversible* (dapat berkebalikan) dengan efisiensinya yang tinggi. Yang dimaksud dengan reaksi elektrokimia *reversible* yaitu didalam sebuah baterai terjadi proses pengubahan kimia menjadi tenaga listrik (proses pengosongan) dan sebaliknya dari tenaga listrik berubah menjadi tenaga kimia (proses pengisian) dengan cara proses regenerasi dari elektroda – elektroda yang dipakai yaitu, dengan melewati arus listrik dalam arah polaritas yang berlawanan didalam sel [7].

Baterai merupakan salah satu komponen utama dalam sistem *Uninterruptible Power Supply* (UPS) yang berfungsi sebagai sumber daya cadangan ketika pasokan listrik utama terganggu. Baterai menyimpan energi listrik dalam bentuk energi kimia dan mengubahnya kembali menjadi listrik saat UPS beroperasi dalam mode baterai. Kinerja baterai sangat menentukan *backup time* dan *remaining time*, yang menjadi

parameter penting dalam menjaga kontinuitas suplai daya untuk beban kritis seperti data *center*, fasilitas pemerintah, dan industri [1][2][7].

Sistem baterai berperan penting dalam menjaga kontinuitas daya pada beban kritis. Karakteristik beban sangat mempengaruhi performa baterai, terutama pada sistem yang terintegrasi dengan sumber energi terbarukan maupun sistem cadangan daya. Pemilihan jenis modul sumber energi yang sesuai dengan karakteristik beban dapat meningkatkan efisiensi pengisian dan pemanfaatan baterai secara optimal [17]. Suhu lingkungan memiliki pengaruh signifikan terhadap umur baterai. Kenaikan suhu 10°C dapat mempercepat degradasi baterai hingga dua kali lipat [13]. IEEE merekomendasikan suhu ideal 20–25°C untuk menjaga umur baterai stasioner [14].

2.2.3.1 Jenis-jenis Baterai

Baterai UPS dibagi menjadi beberapa jenis utama berdasarkan teknologi penyimpanan energi :

1. **Baterai *Lead-Acid* (Asam Timbal)** adalah jenis baterai paling umum digunakan pada UPS karena biaya relatif rendah dan kapasitas besar. Terdapat dua *type* diantaranya sebagai berikut :
 - ***Flooded* (Basah)** : Menggunakan elektrolit cair yang memerlukan perawatan rutin dan ventilasi.
 - ***Sealed* (Tertutup/VRLA – Valve-Regulated Lead Acid)** :
Baterai tertutup dengan katup pengatur tekanan sehingga tidak memerlukan perawatan rutin dan lebih aman digunakan di ruangan tertutup [10].
2. **Baterai *Lithium-ion*** merupakan baterai yang memiliki densitas energi lebih tinggi, umur siklus lebih panjang, dan lebih ringan dibandingkan baterai *lead-acid*. Kekurangannya adalah biaya awal yang tinggi dan kebutuhan sistem proteksi yang lebih kompleks [10].
3. **Baterai *Nickel-Cadmium* (Ni-Cd)** merupakan baterai yang digunakan untuk aplikasi khusus, terutama yang memerlukan performa pada suhu ekstrem, meskipun biayanya lebih tinggi dan memiliki isu lingkungan.

2.2.3.2 Kelebihan Baterai *Valve-Regulated Lead Acid* (VRLA)

Baterai jenis *Valve-Regulated Lead Acid* (VRLA) merupakan jenis baterai *sealed lead-acid* yang banyak digunakan pada UPS karena memiliki beberapa keunggulan diantaranya sebagai berikut :

- **Perawatan Minimal**

Tidak memerlukan pengisian air secara rutin, sehingga praktis untuk penggunaan indoor [10].

- **Keamanan dan Kebocoran Rendah**

Desain tertutup dengan katup pengatur tekanan mengurangi risiko tumpahan elektrolit dan pelepasan gas berbahaya.

- **Fleksibilitas Pemasangan**

Dapat dipasang secara horizontal atau vertikal, memudahkan integrasi ke rak baterai atau ruang terbatas [1][7].

- **Kinerja Stabil**

Tegangan *output* relatif stabil selama pengosongan hingga mendekati batas *cut-off*, sesuai standar UPS kelas VFI yang mensyaratkan stabilitas $\pm 1-2\%$ dan THD $\leq 3\%$ [1].

- **Biaya Operasional Lebih Rendah**

Umur siklus cukup baik dan perawatan minimal membuat VRLA menjadi pilihan ekonomis untuk cadangan daya jangka menengah.

Pemilihan baterai untuk UPS data *center* harus mempertimbangkan faktor kapasitas beban, durasi *backup*, ruang pemasangan, dan keamanan operasional [2][3]. VRLA menjadi pilihan utama karena kombinasi keandalan, keamanan, dan kemudahan perawatan. Sementara itu, baterai lithium-ion mulai populer untuk aplikasi yang membutuhkan densitas energi tinggi, dan umur panjang [10]. Pemilihan jenis baterai yang tepat berpengaruh langsung pada performa UPS, termasuk kemampuan mempertahankan *backup time* dan *remaining time* selama gangguan listrik [1][7].

Kapasitas baterai dinyatakan dalam satuan ampere-hour (Ah) dan menunjukkan kemampuan baterai dalam menyuplai arus listrik selama periode tertentu. Namun, kapasitas baterai tidak bersifat konstan dan dipengaruhi oleh besarnya arus pelepasan

(*discharge current*). Hubungan antara kapasitas baterai dan arus pelepasan dijelaskan melalui hukum Peukert, yang menyatakan bahwa semakin besar arus yang ditarik, maka kapasitas efektif baterai akan menurun [12].

Selain arus pelepasan, faktor lain seperti suhu operasi, kondisi pengisian (*state of charge*), dan umur baterai juga mempengaruhi kapasitas aktual yang dapat digunakan. Oleh karena itu, perhitungan kapasitas baterai dalam sistem UPS perlu mempertimbangkan faktor koreksi agar hasil perhitungan lebih mendekati kondisi aktual [13], [14].



Gambar 2.9 Inverter

Sumber : Pratama, N., & Cahyono, B. D. (2022)

Inverter digunakan untuk mengubah tegangan input DC menjadi tegangan AC. Inverter dapat menghasilkan tegangan variabel atau yang dapat disesuaikan sebagai outputnya. Tenaga surya, sel bahan bakar, baterai, dan sumber tegangan DC lainnya adalah semua opsi untuk input inverter sumber tegangan [7].

Inverter ini berfungsi sebagai penyedia listrik cadangan baik di kantor maupun rumah, sebagai daya darurat saat listrik rumah padam. Inverter merupakan rangkaian yang dapat digunakan untuk menggantikan peran PLN jika terjadi pemadaman atau

gangguan dari PLN, seperti yang sering kita alami saat ini. Berperan dalam mengubah energi DC dari sumber energi terbarukan menjadi energi listrik AC, yang merupakan jenis energi yang kita gunakan sehari – hari. Inverter ini dapat digunakan berbagai barang elektronik, termasuk komputer, alat pertukangan, pompa air, kipas angin, sistem pasokan energi untuk rumah di daerah terpencil dan banyak masih banyak lagi [7].



Gambar 2.10 Rectifier

Sumber : Pratama, N., & Cahyono, B. D. (2022)

Rectifier adalah perangkat yang digunakan sebagai pengubah tegangan bolak-balik (AC) menjadi tegangan arus searah (DC). Penyearah dibagi menjadi versi fase tunggal dan tiga fase berdasarkan tegangan suplai untuk input. Konverter satu fasa AC-DC terbagi menjadi tiga jenis, salah satunya yaitu merupakan penyearah dioda. Pada rangkaian penyearah digunakan tiga buah komponen dalam pembuatannya yaitu terdiri dari sumber arus AC, dioda serta sebuah load untuk dilakukan pengukuran [7].

Rectifier dan *charger block* biasanya dideskripsikan bersama-sama karena posisi mereka biasanya berdekatan. Mereka bertanggung jawab menerima arus listrik dari luar, mengolahnya, lalu menyimpannya di dalam baterai untuk digunakan

kelak. *Rectifier* mengubah arus bolak-balik (AC) dari asupan listrik luar menjadi arus searah (DC). Setelah *rectifier* mengubah arus, *charger block* mengirimkannya ke baterai untuk disimpan. Cadangan energi ini akan menjadi asupan daya ketika listrik mati, mencegah perangkat elektronik mati mendadak.

2.2.3.3 Fungsi dan Peranan UPS pada Sistem Kelistrikan

Fungsi utama UPS adalah menjamin kontinuitas suplai daya tanpa jeda waktu yang dapat mengganggu operasi peralatan. Pada sistem dengan tingkat kritikalitas tinggi, gangguan daya dalam waktu sangat singkat sekalipun dapat menyebabkan kerusakan sistem, kehilangan data, atau berhentinya proses produksi. Oleh karena itu, UPS digunakan sebagai lapisan proteksi pertama sebelum sistem cadangan lainnya seperti generator set (genset) beroperasi [6].

Dalam konteks data *center* dan fasilitas infrastruktur penting, UPS berperan sebagai bagian dari sistem manajemen daya (*power management*) yang terintegrasi. Sistem ini dirancang untuk memenuhi standar keandalan tertentu, seperti yang dijelaskan dalam standar TIA-942 mengenai tiering level data *center* [3], [4]. UPS menjadi komponen kunci dalam menjamin ketersediaan daya sesuai tingkat tier yang direncanakan.

2.2.3.4 Klasifikasi UPS Berdasarkan Standar IEC 62040-3

Uninterruptible Power Supply (UPS) diklasifikasikan berdasarkan karakteristik hubungan antara tegangan dan frekuensi input terhadap output. Standar IEC 62040-3 mengelompokkan UPS ke dalam tiga kategori utama, yaitu *Voltage and Frequency Dependent* (VFD), *Voltage Independent* (VI), dan *Voltage and Frequency Independent* (VFI).

UPS dengan klasifikasi VFD atau *offline* UPS sangat bergantung pada kualitas sumber listrik utama. Tegangan dan frekuensi output akan mengikuti kondisi input, sehingga UPS tipe ini hanya cocok untuk beban non-kritis. Pada kondisi ini, waktu *transfer* daya relatif lebih lama dan kestabilan tegangan tidak dapat dijamin [1], [6].

UPS tipe VI atau *line-interactive* memiliki kemampuan koreksi tegangan menggunakan *autotransformer*. Meskipun lebih stabil dibandingkan VFD, UPS ini

masih memiliki waktu *switching* ketika terjadi gangguan total pada suplai utama. Oleh karena itu, UPS tipe VI umumnya digunakan pada sistem semi-kritis [7].

UPS tipe VFI atau *online double conversion* merupakan jenis UPS dengan tingkat keandalan tertinggi. Pada sistem ini, beban selalu disuplai oleh inverter, sehingga tidak terjadi waktu perpindahan daya (*zero transfer time*). Tegangan dan frekuensi *output* sepenuhnya independen dari kondisi input, sehingga sangat sesuai untuk data *center* dan fasilitas kritikal lainnya [1], [11].

2.2.3.5 Sistem UPS pada Data Center Berbasis Redundansi

Data *center* modern menerapkan konsep redundansi untuk menghindari *single point of failure* pada sistem kelistrikan. Redundansi UPS umumnya diterapkan dalam konfigurasi N+1 atau 2N, di mana satu atau lebih unit UPS tambahan disediakan sebagai cadangan apabila UPS utama mengalami gangguan [3], [6].

Konfigurasi N+1 memungkinkan sistem tetap beroperasi meskipun satu unit UPS gagal, sementara konfigurasi 2N menyediakan dua sistem UPS independen yang bekerja secara paralel. Penerapan redundansi ini sangat penting untuk memenuhi persyaratan *availability* pada data center Tier III dan Tier IV [3], [5].

2.2.3.6 UPS Online (Double Conversion)

UPS *Online* atau *Double Conversion* merupakan jenis UPS yang bekerja dengan melakukan dua tahap konversi daya, yaitu dari AC ke DC dan kembali ke AC. Pada kondisi normal, sumber listrik PLN dikonversi oleh *rectifier* menjadi arus searah (DC), kemudian disalurkan ke inverter untuk menghasilkan arus bolak-balik (AC) yang stabil bagi beban. Pada saat yang sama, baterai diisi oleh sistem pengisian internal UPS [1], [11].

Keunggulan utama UPS *Online* adalah kemampuan menyediakan suplai daya tanpa waktu perpindahan (*zero switching time*) ketika terjadi gangguan pada sumber utama. Hal ini disebabkan inverter selalu aktif menyuplai beban, baik saat kondisi normal maupun saat UPS beroperasi menggunakan baterai. Oleh karena itu, UPS *Online* sangat sesuai digunakan pada sistem dengan tingkat keandalan tinggi seperti data *center*, bandara, dan sistem industri kritis [1], [2].

Kinerja UPS dapat dievaluasi berdasarkan beberapa parameter utama, antara lain waktu perpindahan (*switching time*), stabilitas tegangan *output*, efisiensi, dan kemampuan suplai daya selama periode *backup*. Waktu perpindahan merupakan parameter penting karena menentukan apakah terjadi gangguan daya pada beban saat sumber utama mengalami kegagalan. Pada UPS *Online*, nilai waktu perpindahan adalah nol milidetik sesuai dengan karakteristik VFI [11].

Stabilitas tegangan *output* juga menjadi indikator penting dalam menilai kualitas UPS. Tegangan *output* yang stabil akan mengurangi risiko kerusakan peralatan dan meningkatkan umur pakai sistem. Selain itu, efisiensi UPS perlu diperhatikan karena berpengaruh terhadap konsumsi energi dan panas yang dihasilkan selama operasi [7].

2.2.3.7 Runtime UPS

Runtime merupakan durasi waktu di mana UPS mampu menyuplai daya ke beban ketika sumber utama tidak tersedia. *Runtime* dipengaruhi oleh kapasitas baterai, besarnya beban, efisiensi inverter, dan karakteristik baterai itu sendiri. Secara teoritis, *runtime* dapat dihitung berdasarkan kapasitas baterai dan arus beban, namun dalam praktiknya sering terjadi perbedaan antara *runtime* teoritis dan *runtime* aktual [6], [7].

Perbedaan ini dapat disebabkan oleh rugi-rugi internal UPS, kondisi baterai yang tidak ideal, serta pengaruh suhu dan usia baterai. Oleh karena itu, analisis *runtime* UPS perlu dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi operasional sistem secara menyeluruh.

Runtime UPS dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, antara lain:

1. Besar daya beban.
2. Kapasitas dan kondisi baterai.
3. Efisiensi inverter.
4. Suhu lingkungan.
5. Usia dan degradasi baterai [10], [13].

Perbedaan antara *runtime* hasil perhitungan teoritis dan *runtime* aktual sering terjadi akibat faktor-faktor tersebut dan menjadi fokus analisis pada penelitian UPS [1], [6].

2.2.3.8 Karakteristik Beban pada Data Center dan Dampaknya Terhadap UPS

Beban pada data *center* bersifat dinamis dan cenderung fluktuatif, tergantung pada aktivitas server, sistem pendingin, dan perangkat jaringan. Beban IT umumnya bersifat nonlinier dan menghasilkan harmonisa arus yang dapat mempengaruhi kinerja UPS [1], [2].

UPS yang digunakan pada data *center* harus mampu menangani beban nonlinier tanpa menurunkan kualitas tegangan *output*. Oleh karena itu, UPS kelas VFI dengan nilai Total *Harmonic Distortion* (THD) $\leq 3\%$ menjadi standar utama dalam lingkungan data *center* [11].

2.2.3.9 Pengaruh Suhu terhadap Performa dan Umur Baterai UPS

Suhu lingkungan merupakan salah satu faktor paling signifikan yang mempengaruhi performa dan umur baterai UPS. Kenaikan suhu operasi baterai di atas nilai nominal (25°C) dapat mempercepat proses degradasi elektrokimia dan meningkatkan nilai resistansi internal baterai [10], [14].

Setiap kenaikan suhu sebesar 10°C dapat mengurangi umur baterai hingga 50%. Kondisi ini menyebabkan kapasitas efektif baterai menurun dan memperpendek waktu *backup* UPS. Oleh karena itu, sistem pendinginan data *center* memiliki peran penting dalam menjaga stabilitas performa UPS [2], [3].

2.2.3.10 Pengaruh Hukum Peukert terhadap Kapasitas Baterai

Efek Peukert menjelaskan hubungan nonlinier antara arus pengosongan baterai dan kapasitas efektif baterai. Pada arus pengosongan tinggi, kapasitas baterai yang dapat dimanfaatkan akan lebih kecil dibandingkan nilai nominalnya [13], [15].

Dalam sistem UPS data *center*, beban besar menyebabkan arus pengosongan baterai meningkat secara signifikan. Hal ini menyebabkan perbedaan antara *runtime* teoritis dan *runtime* aktual yang ditampilkan oleh UPS. Oleh karena itu, perhitungan kapasitas baterai harus mempertimbangkan efek Peukert agar estimasi *runtime* lebih realistis [2], [13].

2.2.4 Mechanical Equipment Pada Data Center

Selain kelistrikan, sistem mekanikal juga vital untuk menjaga stabilitas lingkungan operasional server (suhu, kelembapan, dan keamanan fisik).

2.2.4.1 Precision Cooling System (PAC)

Precision Cooling System adalah sistem pendingin khusus untuk data center, server room, atau ruangan elektronik *sensitive* lainnya yang membutuhkan :

- Kontrol suhu yang sangat presisi ($\pm 1^{\circ}\text{C}$),
- Kontrol kelembaban (humidity),
- Operasi 24/7 tanpa henti,
- Dan kemampuan menghadapi panas dengan densitas tinggi (*thermal loads*) dari peralatan IT seperti *server, switch, storage*.

Sistem ini berbeda dari AC rumah/kantor biasa (*comfort cooling*), karena *precision cooling* dirancang untuk:

- Menjaga suhu & kelembaban yang konsisten, bukan kenyamanan manusia,
- Mendistribusikan udara secara terarah & konsisten ke area peralatan (*server racks*),
- Mampu mengontrol aliran udara dan menangani kepadatan panas tinggi.

2.2.4.2 Computer Room Air Conditioning (CRAC)

CRAC adalah singkatan dari *Computer Room Air Conditioning* yang masuk kedalam kategori Sistem HVAC, khusus nya untuk ruang komputer atau data center. CRAC adalah unit pendingin aktif yang menggunakan kompresor *refrigerant* (seperti AC biasa) untuk mendinginkan udara dan mengontrol kelembaban. CRAC berfungsi untuk mengontrol dan menjaga suhu dan kelembaban udara di dalam ruang komputer agar sesuai dengan standar yang dibutuhkan oleh peralatan komputer. CRAC juga berperan dalam mendistribusikan udara dingin secara merata dan menghilangkan udara panas yang dihasilkan oleh peralatan komputer.



Gambar 2.11 *Computer Room Air Conditioning (CRAC)*

Sumber: [https://tse4.mm.bing.net/th/id/OIP.QCGShCZHWLpFIstO743q5gHaFj?pid=A
pi&P=0&h=220](https://tse4.mm.bing.net/th/id/OIP.QCGShCZHWLpFIstO743q5gHaFj?pid=Api&P=0&h=220)

Sistem Kerja CRAC dengan cara menyedot udara panas dari ruangan (biasanya dari atas atau belakang), Udara panas didinginkan melalui *coil evaporator* di dalam CRAC, dengan refrigerant sebagai media pendingin, Udara dingin dialirkan kembali ke ruangan melalui lantai (*raised floor*) atau langsung ke *cold aisle*, CRAC juga bisa mengatur kelembaban melalui sistem *humidifier/dehumidifier* di dalamnya.

2.2.4.3 *Computer Room Air Handler (CRAH)*

CRAH adalah unit pendingin yang tidak memiliki kompresor, melainkan menggunakan *chilled water* (air dingin) yang disediakan dari sistem pendingin eksternal (*chiller*). Biasanya digunakan di data *center* besar yang memiliki infrastruktur *chiller* terpusat.

Sistem Kerja CRAH dengan cara menyedot udara panas dari ruangan, Udara panas melewati *cooling coil* yang berisi *chilled water* dari *chiller system*, Udara menjadi dingin, lalu disirkulasikan kembali ke ruangan/*server*, CRAH hanya berfungsi sebagai

air *handler* (pengatur dan penggerak udara), Kontrol kelembaban dilakukan melalui sistem tambahan (*humidifier/dehumidifier*).

2.2.4.4 Fire Suppression System (FSS)

Fire Suppression System (FSS) adalah sistem yang dirancang untuk mendeteksi dan memadamkan kebakaran secara cepat di lingkungan kritis seperti data *center*; tanpa merusak peralatan elektronik dan tanpa mengandalkan air seperti pada sistem *sprinkler* biasa.



Gambar 2.12 *Fire Suppression System* (FSS)

Sumber : https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTHs_cfVVGvfJcLwNpDprqdzRBP8QmFmDjvo_g&s

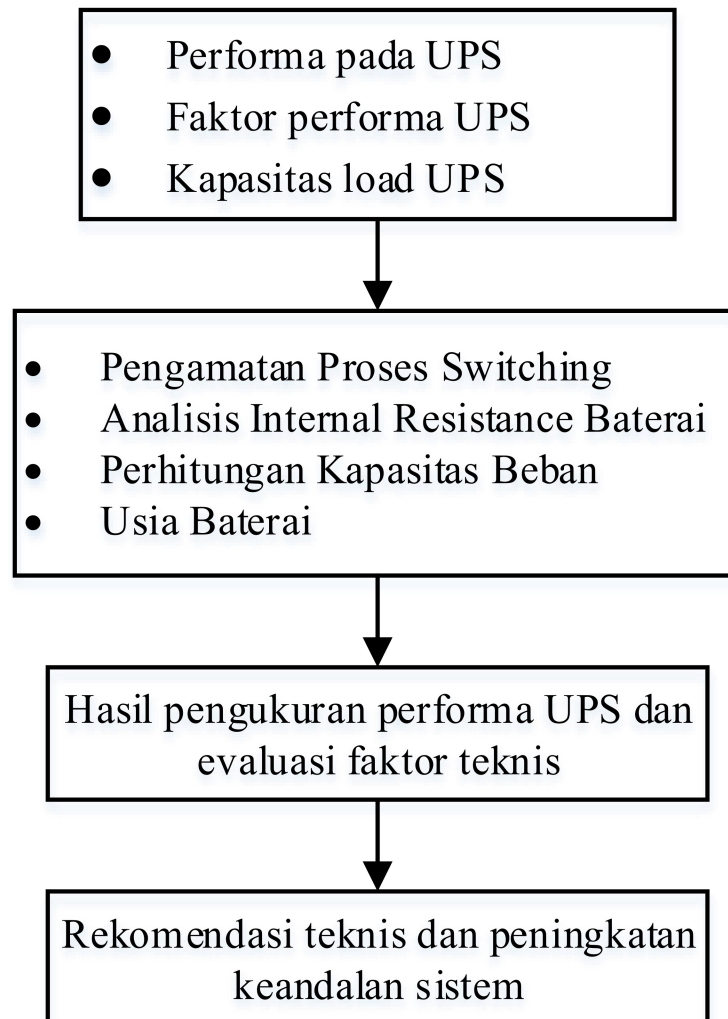
FSS merupakan bagian vital dari sistem proteksi karena data *center* mengandung peralatan elektronik sensitif, Menyimpan data penting dan mahal, dan beroperasi 24/7 dan tidak boleh mengalami *downtime*. Tujuan Utama FSS:

1. Deteksi cepat sumber kebakaran (bahkan sebelum api muncul),
2. Pemadaman otomatis, tanpa intervensi manusia,
3. Meminimalkan kerusakan pada perangkat IT (tidak boleh pakai air biasa),
4. Menjaga kontinuitas operasional (tanpa *shutdown* berkepanjangan),

5. Memenuhi standar keselamatan (NFPA, FM-200, ISO, dll).

2.3 Kerangka Pemikiran

Berikut terlampir *flowchart* kerangka pemikiran pada penelitian ini :



Gambar 2.13 *Flowchart* Kerangka Pemikiran

Data *center* merupakan fasilitas vital yang menampung perangkat IT, aplikasi, dan data penting yang harus beroperasi 24/7. Kontinuitas daya menjadi aspek kritis agar tidak terjadi *downtime*. Untuk itu, UPS (*Uninterruptible Power Supply*) digunakan sebagai penyangga daya sementara terjadi gangguan listrik. Permasalahan yang mendasari pentingnya menjaga kontinuitas suplai listrik agar data *center* tetap beroperasi secara optimal tanpa gangguan. UPS menjadi utama dalam menunjang keandalan tersebut.

Namun, berbagai teknis dapat memengaruhi performa UPS, seperti *switching time*, *internal resistance* baterai, kapasitas beban, dan umur baterai. Oleh karena itu, dilakukan analisis performa UPS berdasarkan parameter-parameter tersebut guna mengetahui sejauh mana keandalan UPS dalam menjamin suplai listrik ke data *center*. Hasil analisis ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi peningkatan sistem.