BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Eksplorasi terhadap literatur terdahulu mengungkap sebuah kesenjangan riset (*research gap*) yang nyata pada ranah optimasi utilitas tata udara terpusat. Mayoritas kajian teknis HVAC komersial terkini sangat bergantung pada algoritma *Machine Learning* tingkat lanjut yang menuntut infrastruktur sistem kendali otomasi berbiaya tinggi. Di sisi lain, metode penjadwalan pemeliharaan lokal masih banyak yang terpaku pada usia pakai komponen statistik atau menggunakan *sequencing* kapasitas statis yang mengabaikan asimetri degradasi antar mesin.

Sebaliknya, metode statistik regresi linier berganda yang terbukti tangguh sebagai penaksir tak bias (*unbiased estimator*) sangat dominan digunakan pada rumpun ilmu agrikultur, bisnis retail, dan sosial-demografi, namun potensinya jarang dieksploitasi untuk audit termodinamika mekanikal. Penelitian ini mendisrupsi kebuntuan infrastruktur tersebut dengan mengawinkan ketangguhan analisis regresi linier terapan dengan parameter termomekanis teknik elektro. Pemetaan komparasi komprehensif antara 12 penelitian terdahulu dengan kebaharuan (*novelty*) tesis ini dijabarkan pada matriks *state-of-the-art* dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Matriks *State-of-the-Art* dan Pemetaan *Research Gap*

No	Penulis & Tahun	Judul Artikel	Fokus Metode & Research Gap	Resolusi / Novelty Tesis
1	Wang, X., *et al.* (2025)	*A Hierarchical Control Framework for HVAC Systems: Day-Ahead Scheduling and Real-Time Model Predictive Control Co-Optimization*	**Metode:** *Attention-LSTM* dan optimasi PSO. **Gap:** Membutuhkan komputasi awan dan memicu *black-box problem* bagi operator.	Menggunakan Regresi Linier berkonstanta dari *log sheet* harian yang *agile*, transparan secara kausalitas, dan tanpa otomasi awan.

No	Penulis & Tahun	Judul Artikel	Fokus Metode & Research Gap	Resolusi / Novelty Tesis
2	Wang, L., & Li, X. (2025)	*Machine Learning-Driven Optimal Control Method for HVAC Systems*	**Metode:** *Deep Q-Networks* (DQN). **Gap:** Rentan terhadap kesenjangan simulasi-ke-realitas (*sim-to-real gap*) dan kendala keamanan jika diterapkan langsung.	Pendekatan regresi memberikan interpretasi kausalitas mutlak (*explainability*), di mana parameter regresi memotret degradasi energi riil.
3	Wang, Z., *et al.* (2023)	*Performance Evaluation of Chiller Fault Detection and Diagnosis Using Only Field-Installed Sensors*	**Metode:** Deteksi dengan model *data-driven*. **Gap:** Fokus murni pada klasifikasi jenis anomali tanpa menguantifikasi besaran kerugian finansial hariannya.	Mentransmutasikan deviasi efisiensi spesifik (kW/TR) secara absolut menjadi matriks *Cost of Poor Performance* (CoPP) berbasis argo tagihan.
4	Zulkafli, N. I., *et al.* (2023)	*Performance analysis and optimisation of the chiller-air handling units system with a wide range of ambient temperature*	**Metode:** *Linear Programming* (LP). **Gap:** Formulasi teoritis kurang adaptif dalam memotret degradasi termomekanis asimetris secara historis.	Mengisolasi anomali performa asimetris (daya statis β_0 dan marjinal β_1) murni dari data empiris kompresor untuk menentukan *staging*.
5	Fachruroji (2019)	*Peningkatan Efisiensi Sistem Pendingin Udara di Gedung Perkantoran Dengan Optimasi Pembebanan Operasi Chilled Water System*	**Metode:** Optimasi pembebanan *flow rate*. **Gap:** Dikendalikan berdasarkan batas atas kapasitas unit, tanpa mendeteksi laju keausan internal kompresor.	Merestrukturisasi *sequencing*: mesin berkoefisien regresi terburuk sebagai *standby*, dan mesin berefisiensi tinggi sebagai beban dasar.
6	Wijaya, L. S. (2021)	*PERANCANGAN PENJADWALAN PERAWATAN MESIN CHILLER DENGAN METODE RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE (RCM) II DAN AGE REPLACEMENT DI PT. XYZ*	**Metode:** RCM II & *Age Replacement*. **Gap:** Bergantung pada probabilitas usia statis (*preventive*), bukan pada besaran pemborosan OPEX riil.	Menggeser paradigma menuju perawatan berbasis kondisi (*condition-based*) di mana eksekusi *overhaul* dijustifikasi oleh tingkat kebocoran CoPP.
7	Putri, M. F., *et al.* (2016)	*ANALISIS KINERJA CHILLER DI GEDUNG SENAYAN CITY*	**Metode:** Komparasi deskriptif nilai COP aktual dan SNI. **Gap:** Sampel data singkat, tanpa komputasi deret waktu maupun purifikasi uji asumsi klasik.	Menerapkan uji statistik asumsi klasik (BLUE) pada observasi penuh 366 hari untuk memfiltrasi bias inersia termal bangunan.

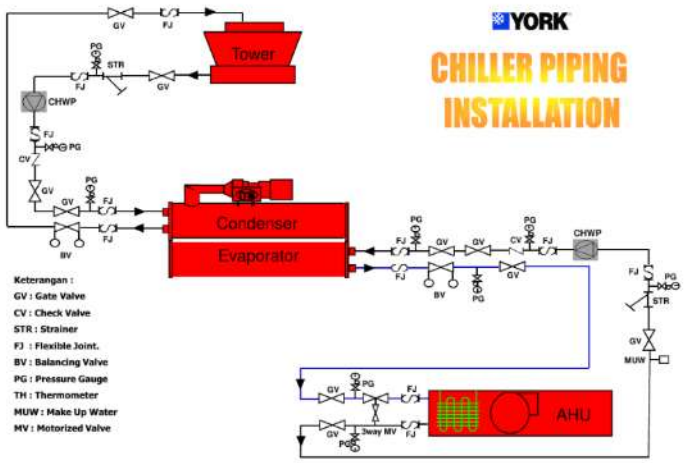
No	Penulis & Tahun	Judul Artikel	Fokus Metode & Research Gap	Resolusi / Novelty Tesis
8	Shaputra, R. D., & Hidayat, S. (2020)	*Implementasi regresi linier untuk prediksi penjualan dan cash flow pada aplikasi point of sales restoran*	**Metode:** Regresi linier sederhana. **Gap:** Murni memetakan target transaksi bisnis, mengabaikan parameter fisik/elektronik di lapangan.	Menggabungkan hukum fisika (termodinamika) dengan struktur operasional bisnis utilitas (tagihan kelistrikan aktif).
9	Choerunnisa, R. A., *et al.* (2021)	*Analisis Faktor Yang Mempengaruhi Tingkat Produksi Jahe Di Indonesia Menggunakan Metode Regresi Linier Berganda*	**Metode:** Regresi linier OLS. **Gap:** Fokus pada sistem ekologi terbuka di mana parameter alam (cuaca) tak dapat diintervensi manusia.	Berfokus pada sistem utilitas tertutup (*closed loop*), sehingga deviasi efisiensi dapat langsung dikoreksi operator via *staging*.
10	Ganessa, N. A. P., *et al.* (2021)	*ANALISIS FAKTOR YANG MEMPENGARUHI INDEKS HARGA KONSUMEN*	**Metode:** Regresi linier & *Cochran Orcutt*. **Gap:** Analisis regresi terikat pada kebijakan makroekonomi publik dan moneter nasional.	Mengadopsi ketangguhan metode regresi untuk mendiagnosis kebocoran *Operational Expenditure* (OPEX) berskala kawasan komersial swasta.
11	Prasetyo, R. A., & Helma (2022)	*Analisis Regresi Linear Berganda Untuk Melihat Faktor Yang Berpengaruh Terhadap Kemiskinan di Provinsi Sumatera Barat*	**Metode:** Regresi linier berganda (OLS). **Gap:** Kajian sosiologi/demografi publik yang dievaluasi dalam periode tahunan yang cenderung statis.	Mengeksekusi observasi dinamis fluktuasi beban parsial (*part-load*) harian untuk memitigasi inefisiensi mekanis secara cepat dan responsif.
12	Mona, M. G., *et al.* (2015)	*Penggunaan Regresi Linear Berganda untuk Menganalisis Pendapatan Petani Kelapa*	**Metode:** Regresi linier berganda. **Gap:** Evaluasi ekonomi berskala mikro (individu) dengan variabel bebas yang terbatas pada luas lahan fisik.	Eksekusi audit kelistrikan beban berat dengan jam operasional dinamis yang melayani mal, perkantoran, apartemen, dan hotel.

Eksplorasi terhadap kedua belas literatur terdahulu membuktikan adanya kekosongan instrumen diagnostik yang praktis, aplikatif, dan akuntabel. Tesis ini membalikkan paradigma tersebut; pendekatan regresi yang secara tradisi digunakan pada riset peramalan bisnis diadopsi penuh sebagai basis perancangan sistem pendukung keputusan (*decision support system*) di ruang mesin. Keluaran parameter efisiensi (kW/TR) tidak dibiarkan mengambang sebagai metrik fisik semata, melainkan dikonversi menjadi valuasi kerugian riil *Cost of Poor Performance* (CoPP). Valuasi finansial inilah yang selanjutnya digunakan untuk melegitimasi eksekusi perbaikan berat (*major overhaul*) kompresor dan penataan ulang konfigurasi operasi harian (*chiller staging*) secara presisi.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Prinsip Kerja Sistem Refrigerasi Kompresi Uap pada *Chiller* Sentrifugal

Sistem tata udara terpusat (*centralized chiller plant*) pada fasilitas *mixed-use* berskala masif beroperasi berdasarkan prinsip termodinamika siklus kompresi uap mekanis (*vapor compression cycle*). Mesin pendingin (*chiller*) sentrifugal bertugas memindahkan kalor laten dari dalam gedung ke lingkungan eksternal melalui empat fase termodinamika kontinu yang berinteraksi dalam sebuah sistem tertutup.



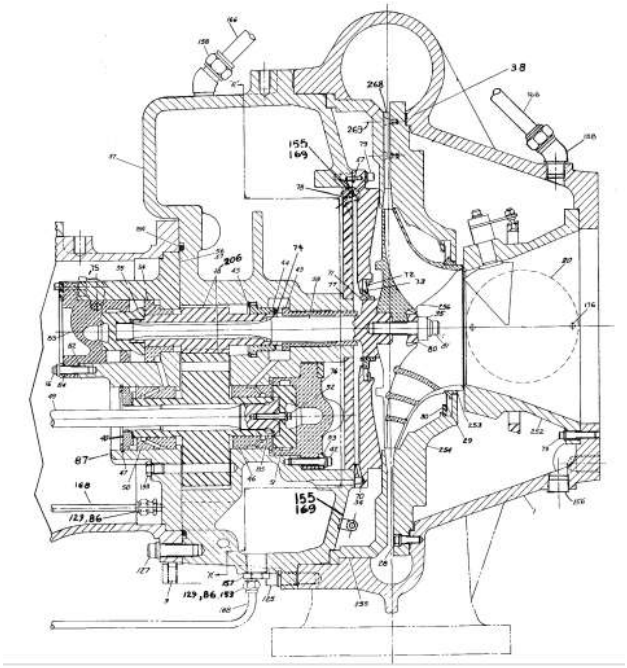
Gambar 2.1. Skema Dasar Siklus Pendinginan pada *Chiller* (York).

Siklus termodinamika tersebut terbagi menjadi empat tahapan utama:

1. Evaporasi (Penyerapan Kalor): Proses dimulai di evaporator, sebuah penukar kalor (*heat exchanger*) tipe *shell-and-tube*. Air dingin sirkulasi (*chilled water*) yang membawa beban panas laten dan sensibel dari area bangunan masuk ke dalam tabung evaporator. Di sisi cangkang (*shell*), refrigeran cair bertekanan rendah menyerap kalor dari *chilled water* tersebut sehingga mendidih dan berubah fasa menjadi uap refrigeran jenuh.
2. Kompresi Isentropik (Kerja Mekanis): Uap refrigeran bersuhu dan bertekanan rendah ditarik masuk ke dalam mulut kompresor sentrifugal. Impeler yang digerakkan oleh motor listrik berputar pada kecepatan tinggi, memberikan gaya sentrifugal yang melontarkan gas refrigeran ke arah luar *volute*, sehingga secara drastis meningkatkan tekanan dan temperatur uap refrigeran. Kinerja motor kompresor inilah yang menyerap energi kelistrikan aktif (kWh) paling masif di dalam keseluruhan sistem.
3. Kondensasi (Pelepasan Kalor): Uap refrigeran bertekanan tinggi didorong masuk ke kondensor. Air pendingin (*condenser water*) yang disirkulasikan dari menara pendingin (*cooling tower*) menyerap panas superpanas (*superheat*) dari refrigeran, menyebabkan refrigeran mengembun kembali menjadi fasa cair. Air kondensor yang memanas kemudian dipompa kembali ke *cooling tower* untuk membuang kalor ke udara bebas atmosfer.
4. Ekspansi Isentalpik (Penurunan Tekanan): Refrigeran cair bertekanan tinggi mengalir melewati katup ekspansi (*expansion valve*). Katup ini memberikan restriksi mekanis yang menurunkan tekanan dan suhu refrigeran secara drastis melalui proses *throttling*, menghasilkan efek pendinginan (*flash gas*) sebelum refrigeran diinjeksikan kembali ke evaporator untuk mengulang siklus.

2.2.2 Anatomi Kompresor Sentrifugal dan Modulasi *Pre-Rotation Vane* (PRV)

Kapasitas pendinginan pada kompresor sentrifugal dikendalikan secara mekanis oleh perangkat Pre-Rotation Vane (PRV). PRV adalah serangkaian sudu pengarah yang terletak tepat di saluran masuk (suction) kompresor, berfungsi mengatur sudut dan volume aliran massa gas refrigeran yang akan menabrak mata impeler.



Gambar 2.2 Anatomi Internal Kompresor Sentrifugal (York).

Pada realitas operasional, inersia termal bangunan menyebabkan kompresor sangat jarang berada pada titik ekuilibrium beban penuh (*full-load*). Ketika beban pendinginan bangunan menurun, sistem kendali memerintahkan aktuator PRV untuk menutup sebagian. Pada mesin yang sehat dengan tingkat presisi aerodinamis yang masih tinggi, penyempitan aliran gas ini akan mengurangi kerja kompresi isentropik, sehingga menurunkan tarikan arus listrik pada motor secara proporsional. Namun, dinamika operasi pada beban parsial (*part-load*) yang fluktuatif memicu tekanan termomekanis yang mengakselerasi degradasi aset melalui dua mekanisme utama:

1. Keausan Bantalan Poros (*Journal Bearing Wear*): Friksi asimetris pada poros impeler akibat pergeseran beban radial secara konstan meningkatkan rugi-rugi mekanis. Motor induksi terpaksa menarik daya aktif (kW) yang tinggi hanya untuk mempertahankan putaran inersia dasar mesin, meskipun sudut bukaan PRV berada pada posisi minimum.
2. Eskalasi Fouling Factor: Modulasi pada beban parsial memengaruhi kecepatan sirkulasi volumetrik air kondensor, mempercepat presipitasi mineral dan pembentukan lapisan kerak (fouling) pada dinding dalam penukar kalor. Lapisan ini bertindak sebagai isolator yang mendegradasi koefisien perpindahan panas menyeluruh (U), memaksa kompresor menembus tekanan buang (discharge pressure) ekstrem.

2.2.3 Instrumen Pengukuran Daya Aktif (*kWh Meter*) pada Kompresor

Sebagai penyeimbang absolut dari instrumen *BTU Meter* yang menguantifikasi produksi termal, *kilowatt-hour* (*kWh*) *Meter* bertindak sebagai instrumen perekam konsumsi kelistrikan di sisi hulu sistem. Pada instalasi tata udara terpusat, motor induksi yang menggerakkan impeler kompresor sentrifugal merupakan entitas penyerap energi listrik terbesar. *kWh Meter* yang terintegrasi pada panel *starter* atau *Variable Frequency Drive* (VFD) kompresor bertugas mengukur dan mengakumulasi besaran energi kelistrikan aktif yang dibakar oleh motor tersebut melintasi durasi operasional.

Secara prinsip kerja, *kWh Meter* elektronik modern tidak hanya membaca besaran arus, melainkan melakukan komputasi integrasi waktu terhadap tiga parameter kelistrikan utama: tegangan sistem (V), arus fasa (I), dan faktor daya ($\cos\varphi$). Laju serapan daya aktif sesaat (kW) pada sistem tiga fasa dikalkulasi dan diintegrasikan terhadap waktu operasional untuk menghasilkan nilai akumulasi energi (kWh) melalui persamaan fundamental kelistrikan:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{3} \cdot V(t) \cdot I(t) \cdot \cos\varphi\,(t)\, dt \tag{2.1}$$

Mengingat besaran kapasitas arus *inrush* dan arus beban penuh (*Full Load Ampere* / FLA) pada motor kompresor 1.800 TR yang sangat masif, modul pengukuran pada *kWh Meter* tidak dihubungkan secara langsung ke busbar utama. Instrumen ini menerima rasio sinyal sekunder yang diturunkan melalui *Current Transformer* (CT) dan *Potential Transformer* (PT). Penggunaan trafo instrumen ini menjamin tingkat presisi pembacaan kelas penagihan (*billing-grade accuracy*), memastikan tidak ada kerugian daya sekecil apa pun yang luput dari pencatatan.

2.2.4 Konvergensi kWh sebagai Metrik Dependen dan Valuasi Finansial

Dalam arsitektur analitik penelitian ini, nilai akumulasi pembacaan *kWh Meter* kompresor ditetapkan secara mutlak sebagai variabel dependen (Y). Penetapan ini mengunci kausalitas antara fenomena mekanis di ruang utilitas dengan realitas tagihan korporat.

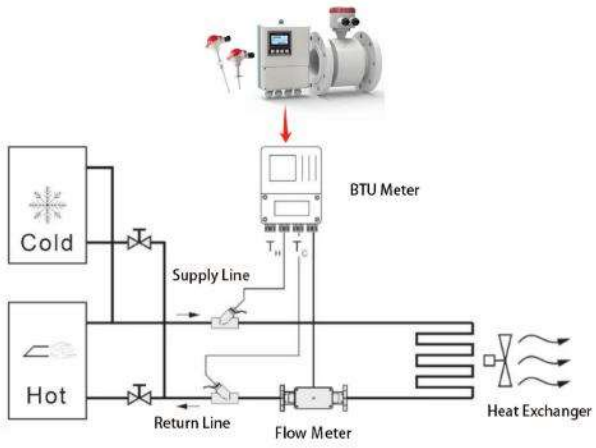
Serapan energi (kWh) yang tercatat pada instrumen ini bukanlah angka statis; ia merupakan respons langsung dari motor listrik yang harus bekerja ekstra keras setiap kali kompresor berhadapan dengan anomali operasional. Ketika akumulasi *fouling factor* di kondensor memaksa peningkatan tekanan buang (*discharge pressure*), atau ketika terjadi keausan pada bantalan poros (*journal bearing*), motor kompresor akan secara otomatis menarik arus (Amper) yang lebih tinggi untuk mempertahankan putaran inersia impeler.

Tarikan arus marjinal ini langsung dikuantifikasi oleh *kWh Meter* menjadi eskalasi angka konsumsi. Oleh karena itu, *kWh Meter* tidak sekadar berfungsi sebagai alat ukur utilitas standar, melainkan bertindak sebagai detektor penelitian yang menerjemahkan seluruh kerugian akibat degradasi termomekanis mesin menjadi metrik kerugian finansial absolut (Rupiah). Data empiris inilah yang memberikan landasan tak terbantahkan dalam formulasi *Cost of Poor Performance* (CoPP) dan justifikasi rekayasa *chiller staging*.

2.2.5 Instrumen Pengukuran Beban Termal (*BTU Meter*)

Validitas sebuah audit energi pada sistem tata udara terpusat sangat bergantung pada presisi akuisisi data beban termal aktual bangunan. Pengukuran ini dieksekusi secara *real-time* oleh *BTU Meter* (*British Thermal Unit Meter*), sebuah instrumen telemetri terintegrasi yang dipasang pada sirkuit pemipaan *chilled water*. Secara arsitektural, *BTU Meter* bukanlah sebuah sensor tunggal, melainkan integrasi komputasi dari tiga instrumen pengukuran fisik:

1. Sensor Aliran (*Flow Meter*): Umumnya menggunakan teknologi ultrasonik atau elektromagnetik untuk mengukur laju aliran volumetrik air dingin ($\dot{V}$) yang disirkulasikan oleh *chilled water pump* ke seluruh area bangunan.
2. Sepasang Sensor Temperatur Presisi: Menggunakan termometer resistansi (seperti RTD PT100) yang diinsersi langsung pada pipa suplai (*supply*) dan pipa kembali (*return*) untuk mengukur diferensial temperatur air ($T_r - T_s$).
3. Kalkulator Termal (*Integrator*): Mikroprosesor yang mengolah data kecepatan aliran dan selisih temperatur secara simultan berdasarkan hukum termodinamika untuk menghitung laju perpindahan panas.



Gambar 2.3 Pemasangan BTU Meter pada Pipa.

Laju pelepasan kalor laten dan sensibel dari struktur bangunan ke dalam sirkuit air dingin dikalkulasi secara instan melalui persamaan fundamental termodinamika:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_r - T_s) \tag{2.2}$$

Di mana $\dot{Q}$ adalah laju perpindahan panas, $\dot{m}$ merupakan laju aliran massa air, C_p adalah kapasitas panas spesifik air, T_r adalah temperatur air kembali (*return*), dan T_s adalah temperatur air suplai (*supply*). Dalam operasional utilitas properti komersial yang mengadopsi satuan imperial standar HVAC, kalkulator termal secara otomatis mengonversi laju perpindahan panas tersebut ke dalam satuan BTU/h melalui formulasi konstanta:

$$\text{BTU/h} = 500 \times \text{GPM} \times (T_r - T_s) \tag{2.3}$$

Keandalan *BTU Meter* dalam merekam fluktuasi diferensial temperatur air dan perubahan laju aliran galon per menit (GPM) menjadikan instrumen ini sebagai satusatunya sumber data absolut untuk mengukur berapa beban pendinginan murni yang sedang ditanggung oleh instalasi *chiller plant* pada suatu waktu spesifik.

2.2.6 *Ton Refrigeration Hour* (TRh) sebagai Metrik Beban Independen

Keluaran data mentah dari *BTU Meter* harus dikonversi ke dalam metrik yang memiliki relevansi manajerial dan kompatibilitas matematis terhadap kapasitas desain kompresor. Dalam rekayasa termodinamika terapan, satuan standar yang digunakan untuk menguantifikasi kapasitas pendinginan sistem berskala masif adalah *Ton of Refrigeration* (TR). Satu TR didefinisikan sebagai laju perpindahan kalor yang dibutuhkan untuk membekukan satu ton air murni (2.000 *lbs*) menjadi es pada suhu 32°F dalam durasi 24 jam. Secara ekuivalensi energi, nilai laju konversi ini ditetapkan pada angka absolut 12.000 BTU/h.

Meskipun TR secara presisi mengukur laju kapasitas pendinginan sesaat, audit efisiensi kelistrikan kompresor membutuhkan parameter yang setara dengan akumulasi serapan daya kelistrikan (kWh). Oleh karena itu, beban termal

diintegrasikan terhadap waktu operasional untuk menghasilkan besaran volume pendinginan kumulatif, yang dikuantifikasi dalam satuan *Ton Refrigeration Hour* (TRh).

$$\text{TRh} = \int_{t_1}^{t_2} \text{TR}\,(t)dt \tag{2.4}$$

Satuan TRh secara empiris merangkum total energi termal yang berhasil dieliminasi dari seluruh zonasi kawasan melintasi suatu jendela waktu tertentu. Dalam arsitektur pemodelan regresi linier operasional pada penelitian ini, TRh diposisikan secara absolut sebagai variabel independen (X). Besaran TRh bertindak sebagai gaya pendorong utama (*driving force*) yang mendikte seberapa lebar aktuator *Pre-Rotation Vane* (PRV) harus membuka, yang pada akhirnya menentukan seberapa besar tarikan daya kelistrikan aktif (kWh) yang akan diserap oleh motor induksi kompresor sebagai variabel dependen (Y).

Ketegasan penetapan TRh sebagai variabel independen mengeliminasi bias evaluasi performa mesin. Kinerja efisiensi kompresor sentrifugal tidak lagi diukur berdasarkan asumsi jam operasi mesin menyala, melainkan dievaluasi murni berdasarkan seberapa besar daya listrik yang terbakar untuk setiap volume energi termal (TRh) bangunan yang berhasil dievakuasi.

2.2.7 Pemodelan Regresi Linier Operasional sebagai Instrumen Diagnostik

Untuk menyingkap tingkat keausan komponen internal yang tersembunyi di balik fluktuasi profil beban kawasan, hukum kekekalan energi harus ditransformasikan ke dalam model regresi linier berganda yang berorientasi langsung pada biaya utilitas (*billing-driven*). Pendekatan kuadrat terkecil (*Ordinary Least Squares* / OLS) yang secara tradisi banyak digunakan untuk mengestimasi produktivitas atau meramalkan indeks harga, direkayasa ulang dalam tesis ini sebagai instrumen audit kelistrikan.

Persamaan regresi memosisikan serapan energi kelistrikan aktif kompresor sebagai variabel dependen (Y), yang merespons secara linier terhadap akumulasi

produksi pendinginan kawasan (*Tons of Refrigeration Hours* - TRh) sebagai variabel independen (X). Model dieksekusi melalui persamaan fundamental:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon \tag{2.5}$$

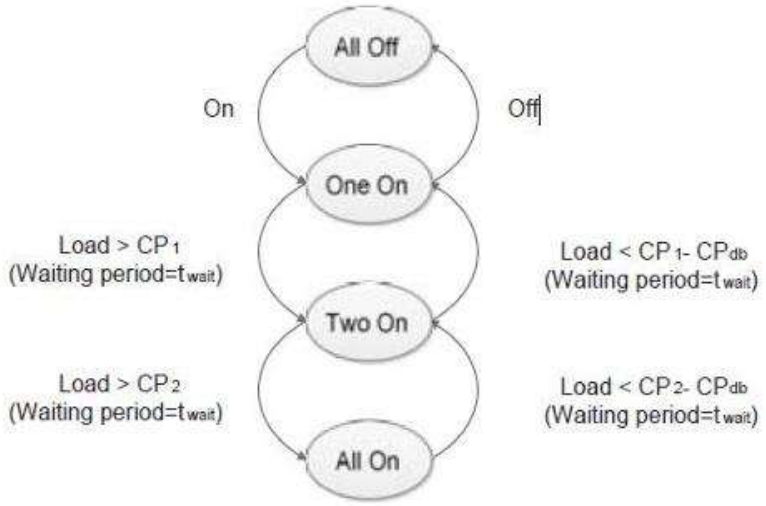
Arsitektur matematis ini mengekstraksi dua parameter krusial yang mengukur kesehatan mesin:

1. Daya Statis Minimum (β_0): Nilai intersep ini merepresentasikan beban daya siaga (*standby power*) atau inersia kelistrikan awal yang diserap oleh sirkuit eksitasi motor, aktuator panel, dan pemanas pelumas (*oil heater*) saat mesin beroperasi tanpa pembebanan termal. Pembengkakan absolut pada nilai β_0 merupakan indikator empiris tingginya tahanan friksi mekanis.
2. Sensitivitas Serapan Daya Marjinal (β_1): Koefisien kemiringan (*slope*) ini menguantifikasi rasio eskalasi konsumsi energi (kWh) untuk setiap tambahan satu unit beban termal (TRh) yang direalisasikan. Laju β_1 yang melonjak curam memvalidasi adanya degradasi aerodinamis impeler atau resistensi termal akibat *fouling factor* pada kondensor.

2.2.8 Tata Kelola *Cost of Poor Performance* (CoPP) dan Strategi *Chiller Staging*

Deviasi efisiensi spesifik kompresor (kW/TR) bukanlah sekadar anomali termodinamika di ruang mesin, melainkan kebocoran absolut pada Anggaran Belanja Operasional (OPEX) gedung. Kesenjangan antara konsumsi daya empiris hasil observasi (regresi) dan konsumsi daya *baseline* ideal (merujuk pada standar pabrikan AHRI 550/590 sebesar 0,6220 kW/TR) wajib dikapitalisasi melintasi durasi operasional menjadi metrik *Cost of Poor Performance* (CoPP) melalui formulasi berikut:

$$\text{CoPP}_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{n} \left(\text{kWh}_{\text{aktual},i} - \text{kWh}_{\text{baseline},i}\right) \times \text{Tarif Internal} \tag{2.6}$$



Gambar 2.3 Arsitektur Sequencing dan Pembagian Beban (Load Sharing) pada *Chiller Plant*. (Huang & Zuo,2014)

Nilai CoPP yang terekstraksi berfungsi sebagai sistem pendukung keputusan berbasis data (*data-driven decision support system*). Matriks kerugian finansial yang terdeteksi asimetris pada setiap unit mesin mendisrupsi paradigma perawatan konvensional yang sebelumnya hanya didasarkan pada jam operasi atau batas usia (*age replacement*). Data empiris OPEX ini melegitimasi eksekusi dua intervensi operasional yang krusial:

1. Restrukturisasi *Chiller Staging*: Mengatur ulang formasi urutan menyalanya mesin pendingin (*sequencing*). Unit dengan nilai koefisien inefisiensi dan kerugian CoPP terburuk harus diisolasi fungsinya murni sebagai unit cadangan (*standby*), sedangkan unit dengan efisiensi yang masih mendekati batas desain ideal diprioritaskan sebagai unit pemikul beban dasar (*base-load chiller*).
2. Pembenaran *Major Overhaul*: Menjustifikasi tingkat urgensi perbaikan mekanikal berat (seperti penggantian *bearing*, inspeksi aerodinamis *impeller*, atau pembersihan *tube* secara sistemik) berdasarkan volume energi yang dapat diselamatkan.

2.3 Kerangka Pemikiran

Operasional kawasan komersial terpadu (*mixed-use development*) memikul beban termal yang sangat fluktuatif sepanjang hari. Fenomena inersia termal fasad bangunan mendistorsi sinkronisasi antara suhu lingkungan eksternal dengan beban pendinginan aktual di dalam gedung. Akibatnya, kuartet kompresor sentrifugal di ruang utilitas terpaksa bermanuver dan beroperasi secara kontinu pada zona pembebanan parsial (*part-load*) yang ekstrem. Kondisi transien ini mempercepat keausan mekanis pada bantalan poros (*journal bearing*) dan memicu akumulasi *fouling factor* pada tabung kondensor. Degradasi termomekanis yang terjadi secara senyap ini memicu lonjakan konsumsi daya aktif yang kerap kali tidak disadari oleh manajemen pengelola hingga manifes pada pembengkakan tagihan listrik bulanan.

Mengisolasi anomali efisiensi ini dari kebisingan fluktuasi beban harian membutuhkan pisau bedah analitis yang presisi. Kerangka pemikiran penelitian ini meruntuhkan pendekatan audit termodinamika konvensional, merekonstruksinya menjadi pemodelan regresi linier operasional yang secara mutlak berorientasi pada struktur biaya (*billing-driven*). Serapan daya kelistrikan aktif (kWh) ditetapkan sebagai variabel dependen (Y), sementara akumulasi produksi pendinginan kawasan (*Tons of Refrigeration Hours* - TRh) diposisikan sebagai variabel independen (X).

Eksekusi arsitektur model ini mengekstraksi dua parameter vital yang memetakan kesehatan mesin secara empiris. Intersep (β_0) membongkar besaran daya statis minimum atau inersia kelistrikan awal saat mesin beroperasi tanpa beban termal. Angka ini bertindak sebagai indikator langsung tingkat friksi pada komponen rotasi kompresor. Di sisi lain, sensitivitas serapan daya marjinal (β_1) merekam tambahan energi untuk setiap tonase pendinginan yang direalisasikan, memetakan secara tajam tingkat resistensi perpindahan panas pada kondensor maupun evaporator.

Parameter teknis tersebut tidak dibiarkan mengambang sebagai rasio desimal di ruang utilitas. Validitas data yang telah melewati purifikasi uji asumsi statistik bertransformasi menjadi instrumen sistem pendukung keputusan (*data-driven decision*

support system). Deviasi antara rasio efisiensi aktual kompresor terhadap batas ideal desain pabrikan (AHRI 550/590) dikuantifikasi dan dikapitalisasi melintasi durasi operasi harian. Transmutasi ini melahirkan matriks kerugian *Cost of Poor Performance* (CoPP). Angka absolut dalam ekuivalensi Rupiah ini membongkar ilusi operasional, memaksa pergeseran paradigma departemen *engineering* dari siklus pemeliharaan reaktif menuju intervensi proaktif.

Evaluasi CoPP memberikan landasan empiris yang tidak terbantahkan bagi jajaran direksi untuk mengeksekusi rekayasa penjadwalan operasi (*chiller staging*). Mesin dengan tingkat kebocoran tertinggi diisolasi sebagai unit cadangan, sementara mesin paling efisien dioptimalkan sebagai pemikul beban dasar. Manuver strategis ini menyelaraskan tata kelola utilitas bangunan secara langsung dengan mandat Peraturan Pemerintah No. 33 Tahun 2023 tentang Konservasi Energi. Kepatuhan terhadap regulasi lingkungan tidak lagi dipandang sekadar sebagai beban administratif, melainkan strategi operasional mutlak untuk melindungi profitabilitas dan daya saing aset properti komersial.

Kompleksitas operasional kawasan komersial terpadu menuntut pertautan absolut antara keandalan mekanikal dan profitabilitas finansial. Degradasi performa pada sistem tata udara sentral berkapasitas masif bukan sekadar anomali termodinamika di ruang utilitas. Penurunan efisiensi secara perlahan akibat keausan mekanis dan akumulasi *fouling factor* merupakan kebocoran *Operational Expenditure* (OPEX) yang membesar secara eksponensial di bawah tekanan struktur tarif regulasi PT PLN (Persero). Mengisolasi sinyal degradasi yang sesungguhnya dari kebisingan fluktuasi beban harian mengharuskan konstruksi kerangka analitik yang presisi dan kebal terhadap ilusi inersia termal bangunan.

Ketergantungan operasional pada akuisisi data melalui pencatatan *log sheet* manual tidak diposisikan sebagai kelemahan metodologis. Keterbatasan infrastruktur otomasi ini justru direkayasa ulang melalui arsitektur pemodelan statistik yang dipaksa tunduk pada asas fisika fundamental. Kerangka pemikiran penelitian ini dirancang sebagai peta jalan penelitian. Alur logika mendestilasi deret waktu konsumsi energi

elektrikal (kWh) dan total produksi pendinginan (TR) melintasi filtrasi asumsi analisis statistik. Transmutasi akhir dari kerangka konseptual ini adalah konversi metrik efisiensi teknis menjadi valuasi moneter empiris.