

Efisiensi dan kesesuaian kapasitas sistem *Plumbing* pada bangunan tinggi berdasarkan beban air hunian dan fasilitas pendukung

Zufri Hasrudy Siregar^{*1}, Arif Fadillah Nasution², Refiza³

^{1,2} Prodi Teknik Mesin, Universitas Al-Azhar Medan, Jl. Pintu Air IV No. 214 Kwala Bekala, Padang Bulan, Medan, Sumatera Utara, Indonesia

³ Prodi Teknik Industri, Universitas Al-Azhar Medan, Jl. Pintu Air IV No. 214 Kwala Bekala, Padang Bulan, Medan, Sumatera Utara, Indonesia
e-mail: ^{*1} rudysiregar7@gmail.com,

Abstrak

Pertumbuhan hunian vertikal di perkotaan Indonesia meningkatkan kompleksitas sistem plumbing, yang harus menjamin ketersediaan air, efisiensi energi, dan kualitas layanan bagi banyak penghuni. Perencanaan konvensional yang mengacu pada asumsi 120 L/orang/hari dan cadangan tangki 3 hari sering kali tidak mencerminkan pola konsumsi aktual, sehingga menimbulkan overdesign dan pemborosan energi. Penelitian ini mengevaluasi efisiensi dan kesesuaian kapasitas sistem plumbing pada bangunan bertingkat menggunakan data primer, observasi lapangan, dan simulasi probabilistik Monte Carlo P95. Model evaluasi berbasis Key Performance Indicators (KPI) terintegrasi mencakup efisiensi air, efisiensi energi pompa, kualitas layanan hidraulik, dan kenyamanan pengguna. Hasil menunjukkan identifikasi titik kritis, seperti kapasitas STP terpadu yang kurang memadai dan deviasi daya pompa, serta potensi optimasi cadangan tangki. Rekomendasi praktis untuk perencanaan sistem plumbing di Indonesia mencakup penyesuaian kapasitas STP berdasarkan proyeksi beban puncak, implementasi daur ulang greywater untuk mengurangi beban Q kotor, penggunaan perangkat hemat air modern, dan audit berkala berbasis KPI untuk memastikan keandalan layanan dan efisiensi energi. Temuan ini menekankan pentingnya perencanaan sistem plumbing berbasis data aktual dan analisis multidimensi untuk meningkatkan kinerja operasional, mengurangi pemborosan energi, dan mendukung keberlanjutan bangunan tinggi di Indonesia

Kata kunci: Efisiensi sistem plumbing; Bangunan bertingkat; Key Performance Indicators (KPI).

Abstract

The rapid growth of vertical housing in urban areas increases the complexity of plumbing system management, as the system must ensure reliable water supply, energy efficiency, and service performance for a large number of occupants simultaneously. However, most plumbing system designs still rely on conventional assumptions such as 120 L/person/day water demand and 3 days of storage capacity, which often do not represent the actual consumption patterns of modern buildings. This study aims to evaluate the efficiency and capacity suitability of plumbing systems in high-rise residential buildings based on occupant water demand and supporting facilities. The novelty of this research lies in the development of an integrated Key Performance Indicators (KPI) framework consisting of four main dimensions: water efficiency, pump energy efficiency, hydraulic service quality, and user comfort. The research method involves numerical analysis of water demand based on the number of occupants, evaluation of Ground Water Tank (GWT) and Sewage Treatment Plant (STP) capacities, and system performance assessment using quantitative KPI metrics. The results demonstrate that the proposed evaluation model effectively identifies operational efficiency levels and provides an analytical basis for optimizing plumbing capacity and sustainable building utility management.

Keywords: Plumbing system efficiency; High-rise building; Key Performance Indicators (KPI).

1. PENDAHULUAN

Urbanisasi vertikal di Indonesia mengalami pertumbuhan yang signifikan dengan laju sekitar 2,5% per tahun, yang mendorong peningkatan pembangunan bangunan tinggi sebagai solusi keterbatasan lahan di kawasan perkotaan [1], [2]. Fenomena ini mengakibatkan meningkatnya kompleksitas sistem utilitas bangunan, khususnya sistem plumbing, yang harus mampu beroperasi secara efisien dan andal dalam kondisi beban yang dinamis [3]. Pada bangunan bertingkat tinggi (>10 lantai), sistem plumbing menghadapi tantangan multidimensi, antara lain distribusi air bersih hingga ketinggian 100–300 meter, pengendalian tekanan hidrostatis agar tetap stabil pada setiap zona, pengelolaan variasi beban air dari berbagai tipe unit hunian, serta penanganan volume air limbah yang besar secara berkelanjutan [4], [5]. Kompleksitas ini semakin meningkat pada bangunan *mixed-use* yang mengintegrasikan fungsi hunian dengan fasilitas pendukung seperti komersial, rekreasi, dan layanan publik [6], [7].

Namun demikian, praktik perencanaan sistem plumbing yang masih banyak digunakan hingga saat ini umumnya mengacu pada metode konvensional seperti Hunter Curves (1940), yang berbasis pada pendekatan fixture unit [8], [9]. Secara matematis, pendekatan ini menghubungkan jumlah *fixture unit* dengan debit puncak melalui fungsi

$$Q_{peak} = f(\sum FU) \dots \dots \dots (1)$$

Meskipun metode ini telah digunakan secara luas, pendekatan tersebut belum mampu merepresentasikan kondisi aktual konsumsi air modern karena tidak mempertimbangkan variasi perilaku pengguna serta penggunaan perangkat hemat air (*low-flow fixtures*) [10], [11]. Akibatnya, desain sistem plumbing cenderung mengalami *oversizing* hingga 3–4 kali kebutuhan aktual [12]. Kondisi ini berdampak pada pemborosan material hingga 40%, peningkatan konsumsi energi pompa sebesar 20–30%, serta meningkatnya *water age* yang berpotensi memicu pertumbuhan bakteri patogen seperti Legionella [13], [14]. Standar nasional seperti SNI 8153:2015 yang masih mengadopsi pendekatan fixture unit juga belum sepenuhnya mampu menangkap dinamika beban air pada bangunan tinggi di Indonesia, khususnya pada kondisi iklim tropis dengan suhu 28–32°C dan kelembaban 70–90% yang mempengaruhi karakteristik aliran, korosi material, serta pola penggunaan air oleh penghuni [15], [16], [17].

Perkembangan penelitian terkini dalam bidang sistem plumbing bangunan tinggi menunjukkan adanya pergeseran dari pendekatan deterministik menuju pendekatan probabilistik dan simulatif. Metode berbasis simulasi seperti *Monte Carlo* digunakan untuk memodelkan distribusi konsumsi air secara lebih realistis melalui pendekatan statistik [18], [19], dengan formulasi debit puncak dinyatakan sebagai

$$Q_{peak} = P_{95}(Q_{simulasi}) \dots \dots \dots (2)$$

di mana nilai persentil ke-95 digunakan sebagai representasi kondisi beban maksimum yang lebih akurat [20], [21]. Selain itu, analisis hidraulik sistem distribusi air semakin berkembang dengan penggunaan persamaan mekanika fluida seperti *Darcy-Weisbach* untuk menghitung kehilangan energi aliran, yaitu:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \dots \dots \dots (3)$$

serta bilangan Reynolds

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \dots \dots \dots (4)$$

untuk menentukan karakteristik aliran dalam pipa. Pemanfaatan perangkat lunak simulasi seperti

EPANET dan *Pipe Flow Expert* memungkinkan analisis distribusi tekanan, debit, serta optimasi jaringan pipa secara numerik dengan tingkat akurasi yang tinggi [4], [22]. Selain itu, konsep *water-energy nexus* juga mulai banyak digunakan untuk mengevaluasi keterkaitan antara konsumsi air dan energi melalui indikator efisiensi energi spesifik

$$\eta = \frac{kWh}{m^3} \dots\dots\dots(5)$$

yang menunjukkan kebutuhan energi untuk setiap volume air yang dipompa [22].

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian yang ada masih berfokus pada konteks negara maju seperti Amerika, Eropa, dan Australia, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi bangunan tinggi di Indonesia yang memiliki karakteristik iklim tropis dan pola konsumsi yang berbeda [23], [24]. Selain itu, validasi empiris terhadap metode probabilistik pada bangunan tinggi dengan jumlah lantai lebih dari 20 masih terbatas, khususnya dalam konteks integrasi antara beban hunian, fasilitas pendukung, kapasitas penyimpanan air (*ground water tank*), pengolahan limbah (*sewage treatment plant*), serta konsumsi energi dalam satu model analisis terpadu [25], [26]. Evaluasi terhadap penerapan standar nasional seperti SNI 8153:2015 dalam kondisi nyata bangunan *mixed-use* juga masih minim, sehingga diperlukan pendekatan yang lebih kontekstual dan berbasis data aktual [27]. Di sisi lain, pemanfaatan perangkat lunak simulasi hidraulik seperti *Pipe Flow Expert* dalam praktik perencanaan sistem plumbing di Indonesia masih belum optimal, padahal perangkat ini mampu memberikan analisis komprehensif terkait *flow rate*, *velocity*, *Reynolds number*, serta *head loss mayor* dan *minor* secara terintegrasi [28], [29].

Meskipun berbagai pendekatan analitis dan simulatif telah dikembangkan untuk meningkatkan akurasi perencanaan sistem plumbing bangunan tinggi, sebagian besar studi masih terbatas pada evaluasi hidraulik jaringan pipa atau estimasi debit puncak tanpa mengintegrasikan aspek konsumsi air aktual, kinerja energi sistem pompa, serta kapasitas infrastruktur utilitas seperti tangki penyimpanan dan instalasi pengolahan limbah dalam satu kerangka analisis terpadu [30], [31]. Selain itu, penelitian empiris yang menguji kesesuaian metode perencanaan konvensional dengan pendekatan probabilistik pada bangunan hunian vertikal di kawasan tropis masih relatif terbatas, khususnya dalam konteks bangunan *mixed-use* dengan variasi beban hunian dan fasilitas pendukung yang kompleks. Keterbatasan ini menyebabkan evaluasi efisiensi sistem plumbing pada bangunan tinggi sering kali belum mampu menggambarkan hubungan antara performa hidraulik, konsumsi energi, dan keberlanjutan operasional sistem utilitas secara menyeluruh [32], [33]. Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan evaluasi yang lebih komprehensif dan berbasis data aktual untuk menilai kesesuaian kapasitas serta efisiensi operasional sistem plumbing pada bangunan tinggi secara lebih akurat [34], [35].

Berdasarkan kesenjangan penelitian tersebut, studi ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi dan kesesuaian kapasitas sistem plumbing pada bangunan tinggi berdasarkan beban air hunian dan fasilitas pendukung melalui pendekatan analisis hidraulik, simulasi probabilistik, serta pengembangan kerangka evaluasi berbasis Key Performance Indicators (KPI) terintegrasi.

Keterbaruan penelitian ini terletak pada pengembangan kerangka evaluasi sistem plumbing bangunan tinggi yang mengintegrasikan empat dimensi utama secara simultan, yaitu efisiensi air (*Water Consumption Index*), efisiensi energi pompa dan kelistrikan (*Load Factor* dan deviasi daya), kualitas layanan hidraulik (rasio *Sewage Treatment Plant* dan headloss), serta kenyamanan pengguna (tekanan dan kualitas air). Pendekatan ini berbeda secara signifikan dengan penelitian terdahulu di Indonesia yang umumnya hanya mengevaluasi sistem plumbing berdasarkan kapasitas tangki dan debit puncak menggunakan metode konvensional seperti *Hunter Curves* atau SNI 8153:2015, tanpa mempertimbangkan interaksi antar-dimensi maupun variasi konsumsi air aktual.

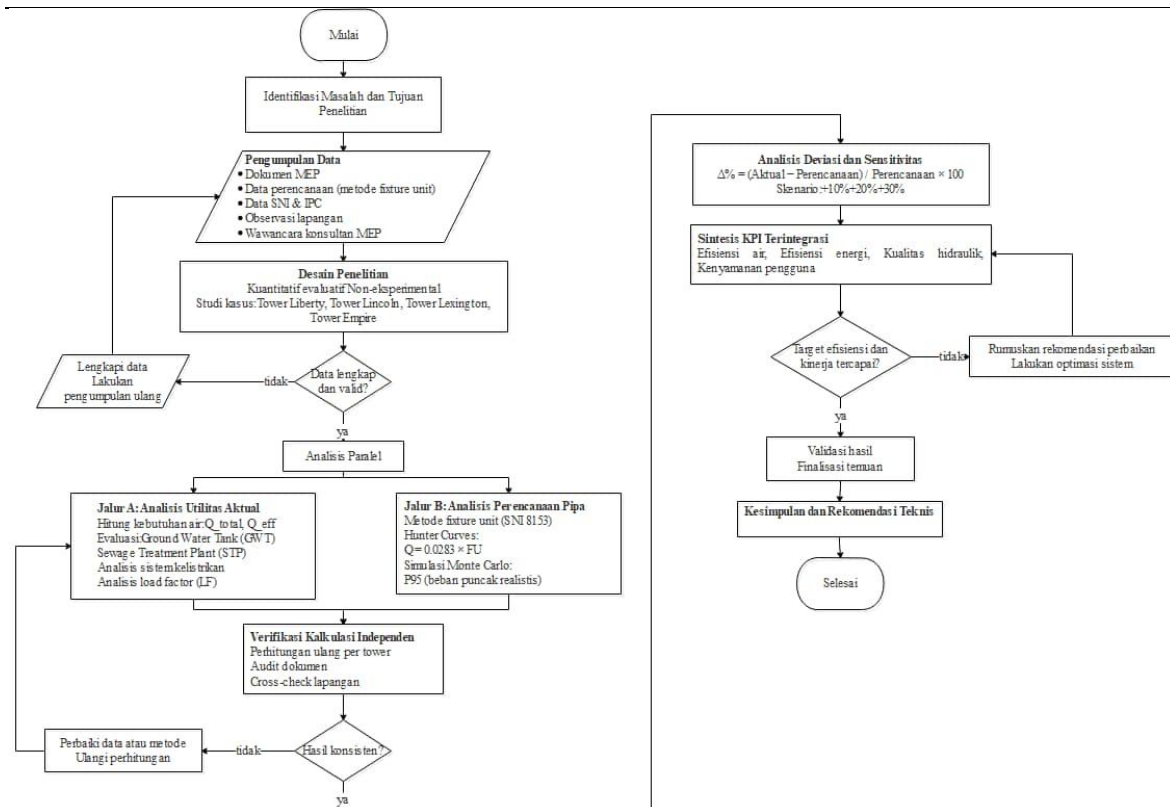
Tabel 1 keterbaruan penelitian beserta perbandingan dengan penelitian terdahulu di Indonesia

Aspek Keterbaruan	Penelitian Terdahulu di Indonesia	Perbedaan / Nilai Tambah Penelitian Saat Ini	Referensi Internasional Terkini (2023–2026)
Integrasi Multidimensi: efisiensi air, efisiensi energi, kualitas hidraulik, kenyamanan pengguna	Studi di Universitas X dan artikel jurnal lokal hanya fokus pada kapasitas tangki dan debit puncak, tanpa integrasi dimensi lain	Memadukan empat dimensi secara simultan, memberikan evaluasi yang lebih holistik	[36]
Pendekatan Probabilistik / Simulatif: Monte Carlo P95 vs Hunter Curves	Penelitian Indonesia menggunakan metode deterministik / SNI 8153:2015 tanpa simulasi probabilistik	Menunjukkan perbedaan estimasi debit puncak hingga 7,91% dan keandalan pada 95% kondisi operasional	[37]
Penggunaan Data Primer & Observasi Lapangan	Studi terdahulu menggunakan asumsi konsumsi standar 120 L/orang/hari, tidak berbasis observasi aktual	Menggunakan data primer dari dokumen MEP dan pengukuran lapangan, mencerminkan pola konsumsi nyata penghuni	[38]
Evaluasi Kapasitas GWT & STP dengan Skenario Hunian	Penelitian sebelumnya hanya mengevaluasi kapasitas minimum berdasarkan standar, tanpa skenario peningkatan hunian	Menguji kapasitas terhadap skenario +10%, +20%, +30% hunian, mendukung optimasi sistem	[39]
Penggunaan Perangkat Hemat Air Modern: dual-flush, sensor faucet, shower WaterSense	Penelitian lokal jarang atau belum mengevaluasi penggunaan perangkat hemat air secara empiris	Menunjukkan pengurangan kebutuhan <i>fixture units</i> residensial 24,2% dan komersial 43%	[40]

2. METODE PENELITIAN

2.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif evaluatif (*quantitative-evaluative approach*) dengan strategi studi kasus komparatif (*comparative case study*) [41], [42]. Rancangan ini dipilih karena penelitian bertujuan untuk mengukur, memverifikasi, dan membandingkan kinerja sistem MEP berbasis data numerik yang tersedia dalam dokumen teknis terstandar, tanpa memerlukan intervensi atau manipulasi variabel. Oleh karena itu, desain ini bersifat non-eksperimental dengan kontrol metodologis yang diterapkan melalui verifikasi kalkulasi independen. Kontrol metodologis non-eksperimental diwujudkan melalui tiga mekanisme: (1) Kalkulasi ulang independen dari level unit ke level tower untuk setiap variabel; (2) Audit silang (*cross-check*) antara hasil kalkulasi mandiri dengan angka dalam dokumen MEP resmi; dan (3) Triangulasi dengan standar normatif (SNI, IPC) dan literatur Scopus tiga tahun terakhir untuk validasi interpretasi.



Gambar 1. Flowchart Penelitian

2.2 Lokasi dan Objek Penelitian

Objek penelitian adalah sistem plumbing air bersih, air kotor, GWT, STP, kelistrikan, dan proteksi kebakaran pada kawasan Podomoro City Deli Medan, mencakup Tower Liberty, Lincoln, Lexington (Tower 3L), dan Tower Empire. Gedung Podomoro Lexington Tower (20 lantai, 8 unit/lantai, 160 unit) dijadikan objek khusus analisis komparatif Hunter Curves vs. Monte Carlo P95.

Tabel 2 Spesifikasi Umum Objek Penelitian

Parameter	Liberty	Lincoln	Lexington	Empire
Jumlah Unit	572	584	563	369
Jumlah Penghuni	1.668	1.603	1.653	1.323
Tinggi Bangunan	121,65 m	121,65 m	121,65 m	118,00 m
Kapasitas GWT (m ³)	1.840	1.840	1.840	985
Kapasitas STP (m ³)	420	420	420	225
Trafo (kVA)	3.160	3.474	3.377	3.412

2.3 Sumber Data dan Pengumpulan Data

Data primer diperoleh dari:

- Dokumen MEP PT. Metakom Cpranata – rekapitulasi kebutuhan air dan listrik,
- Observasi lapangan menggunakan flow meter dan pressure gauge pada jam puncak, dan
- Wawancara konsultan MEP. Data sekunder dari SNI 03-7065-2005, SNI 8153:2015, IPC 2021, ASHRAE Handbook, data PDAM Medan, dan publikasi Scopus 2022–2025.

Tabel 3 Variabel dan Indikator Penelitian

Simbol	Variabel	Satuan	Kelompok
Q _{total}	Kebutuhan air total	m ³ /hari	Air Bersih
Q _{eff}	Kebutuhan efektif (80% Q _{total})	m ³ /hari	Air Bersih
Q _{kotor}	Beban air kotor (80% Q _{eff})	m ³ /hari	Air Limbah
η _{GWT}	Hari cadangan GWT	hari	Kapasitas Tangki
η _{STP}	Rasio kapasitas STP	hari	Pengolahan Limbah
WCI	Water Consumption Index	ltr/unit/hari	Efisiensi Air
Δ%	Deviasi daya aktual vs rencana	%	Kelistrikan
LF	Load factor transformator	%	Kelistrikan
FU	Fixture units	–	Pipa
Q _{Hunter}	Debit puncak Hunter Curves	L/s	Perencanaan Pipa
Q _{MC,P95}	Debit puncak Monte Carlo P95	L/s	Perencanaan Pipa
h _f	Headloss Hazen-Williams	m/segmen	Hidrolik
P	Daya pompa	kW	Energi

2.4 Model Matematis dan Formularium

Perhitungan kebutuhan air menggunakan pendekatan bottom-up dari unit hunian ke total tower. Setiap tipe unit memiliki koefisien konsumsi berbeda berdasarkan jumlah kamar dan penghuni yang diasumsikan

Tabel 4 Formularium Matematis

No	Formula	Keterangan	Acuan
(1)	$Q_{total} = \sum (n \times p \times q)$	Kebutuhan air total tower	SNI 03-7065-2005
(2)	$Q_{eff} = Q_{total} \times 0,8$	Kebutuhan efektif harian	SNI 03-7065-2005
(3)	$Q_{kotor} = Q_{eff} \times 0,8$	Beban air limbah ke STP	Praktek MEP
(4)	$\eta_{GWT} = \frac{V_{GWT}}{Q_{eff}}$	Cadangan tangki (hari)	SNI min. 3 hari
(5)	$\eta_{STP} = \frac{V_{STP}}{Q_{kotor}}$	Rasio kapasitas STP	Min. 1,5 hari
(6)	$WCI = \frac{Q_{total}}{N_{unit}}$	Air per unit (ltr/unit/hr)	KPI Audit
(7)	$\Delta\% = \frac{(Aktual - Perenc)}{perenc} \times 100$	Deviasi daya (%)	IEC 60364
(8)	$LF = \frac{P_{kebutuhan}}{P_{kapasitas}} \times 100$	Load factor trafo (%)	60–85%
(9)	$FU = \sum_i (N_i \times FU_i)$	Total fixture units	IPC 2021
(10a)	$Q = 0,0283 \times \sqrt{FU}$	Debit Hunter (FU ≤ 1000)	Hunter 1940
(10b)	$Q = 0,0281 \times FU^{0,45}$	Debit Hunter (FU > 1000)	Hunter 1940
(11)	$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}}$	Diameter pipa kontinu	Hidrolika
(12)	$h_{f=10,67 \times L \times Q^{1,852} / (C^{1,852} \times D^{4,871})$	Headloss Hazen-Williams	AWWA
(13)	$H_{total} = h_f + H_{statik} + H_{reserve}$	Head total pompa	ASHRAE

(14)	$P = \frac{\rho g Q H}{\eta}$	Daya pompa (kW)	Hidrolika
(16)	$Q_{P95} = \mu_Q + 1,645 \sigma_Q$	MC persentil 95	Cortez-Lara 2024

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil

3.1.1 Komposisi Unit Hunian dan Populasi

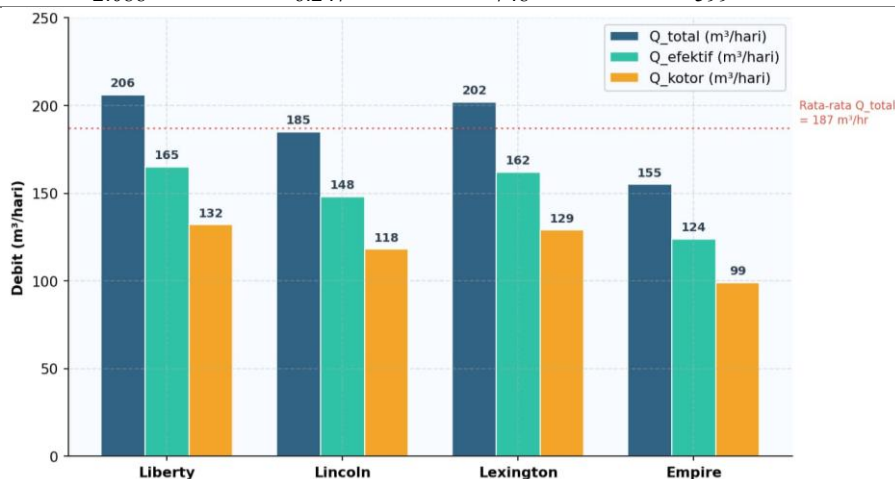
Komposisi unit hunian merupakan fondasi seluruh perhitungan karena setiap tipe unit memiliki koefisien penghuni dan konsumsi berbeda. Standar konsumsi yang diterapkan: studio/1BR = 240 ltr/unit/hari (2 penghuni), 2BR = 360 ltr/unit/hari (3 penghuni), 3BR = 600 ltr/unit/hari (5 penghuni), sesuai SNI 03-7065-2005.

Tabel 5 Komposisi Unit Tower Lexington (Objek Studi Kasus Utama)

Tipe Unit	Unit	Penghuni/Unit	Konsumsi (ltr/unit/hr)	Subtotal (m ³ /hr)
Studio	46	2	240	11,04
1BA	92	2	240	22,08
1BB	46	2	240	11,04
2BA	92	3	360	33,12
2BB	138	3	360	49,68
2BC	46	3	360	16,56
2BD	46	3	360	16,56
3BA	46	5	600	27,60
3BB	21	5	600	12,60
TOTAL	563	1.653	-	200,28

Tabel 6 Rekapitulasi Kebutuhan Air Bersih, Efektif, dan Air Kotor

Tower	Unit	Penghuni	Q total (m ³ /hr)	Q eff (m ³ /hr)	Q kotor (m ³ /hr)
Liberty	572	1.668	206	165	132
Lincoln	584	1.603	185	148	118
Lexington	563	1.653	202	162	129
Empire	369	1.323	155	124	99
TOTAL	2.088	6.247	748	599	478



Gambar 2. Rekapitulasi Kebutuhan Air Total, Efektif, dan Air Kotor per Tower (m³/hari)

3.1.2 Perhitungan Rinci Kebutuhan Air

perhitungan terinci untuk Tower Lexington sebagai objek utama studi kasus:

Hitung Q_{total} per tipe unit:

Studio: $46 \text{ unit} \times 2 \text{ orang} \times 0,120 \text{ m}^3/\text{org}/\text{hr} = 11,04 \text{ m}^3/\text{hr}$

1BA: $92 \text{ unit} \times 2 \text{ orang} \times 0,120 \text{ m}^3/\text{org}/\text{hr} = 22,08 \text{ m}^3/\text{hr}$

2BB: $138 \text{ unit} \times 3 \text{ orang} \times 0,120 \text{ m}^3/\text{org}/\text{hr} = 49,68 \text{ m}^3/\text{hr}$

3BA: $46 \text{ unit} \times 5 \text{ orang} \times 0,120 \text{ m}^3/\text{org}/\text{hr} = 27,60 \text{ m}^3/\text{hr}$

Aplikasi Persamaan $Q_{total} = \sum(n \times p \times q)$ Tower Lexington

$Q_{total} = \sum(n \times p \times q) = 11,04 + 22,08 + \dots + 12,60 = 202 \text{ m}^3/\text{hari}$

Persamaan $Q_{eff} = Q_{total} \times 0,8 = 202 \times 0,8 = 162 \text{ m}^3/\text{hari}$

Aplikasi Persamaan $Q_{kotor} = Q_{eff} \times 0,8$ – Beban Air Kotor Lexington

$Q_{kotor} = Q_{eff} \times 0,8 = 162 \times 0,80 = 129,6 \text{ m}^3/\text{hari} \approx 129 \text{ m}^3/\text{hari}$

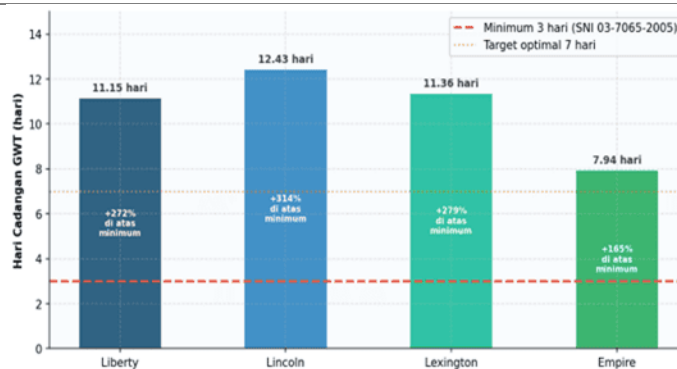
Persamaan (6): $WCI = 202.000 \text{ ltr} \div 563 \text{ unit} = 358,8 \approx 359 \text{ ltr}/\text{unit}/\text{hari}$

3.1.3 Evaluasi Kapasitas Ground Water Tank (GWT)

Evaluasi GWT menggunakan rasio $\eta_{GWT} = V_{GWT} \div Q_{eff}$. Standar minimum SNI 03-7065-2005 menetapkan cadangan minimum 3 hari. Pendekatan dibandingkan terhadap Q_{eff} (bukan Q_{total}) karena konsumsi nyata tidak berlangsung di kapasitas penuh sepanjang hari.

Tabel 7 Evaluasi Kapasitas Ground Water Tank per Tower

Tower	Q_{eff} (m ³ /hr)	V_{GWT} (m ³)	η_{GWT} (hr)	Margin >3hr	Status
Liberty	165	1.840	11,15	271,7%	✓ Sangat Aman
Lincoln	148	1.840	12,43	314,3%	✓ Sangat Aman
Lexington	162	1.840	11,36	278,7%	✓ Sangat Aman
Empire	124	985	7,94	164,7%	✓ Sangat Aman



Gambar 3. Hari Cadangan GWT vs. Minimum SNI 03-7065-2005 (3 hari)

Seluruh tower berada jauh di atas minimum 3 hari, mengindikasikan konservatisme desain yang tinggi. Margin terbesar pada Lincoln (314,3%) menunjukkan potensi optimasi dimensi tangki untuk proyek serupa guna mengurangi investasi modal tanpa mengorbankan keandalan

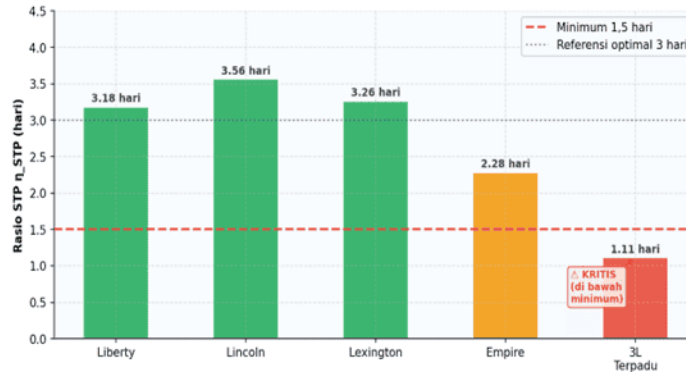
3.1.4 Evaluasi Kapasitas Sewage Treatment Plant (STP)

STP dievaluasi menggunakan $\eta_{STP} = V_{STP} + Q_{kotor}$ Minimum operasional STP biologis aerobik adalah 1,5 hari untuk memastikan waktu tinggal (*Hydraulic Retention Time/HRT*) yang cukup bagi proses degradasi biologis.

Tabel 8 Evaluasi Kapasitas STP per Tower dan Sistem Terpadu 3L

Tower	Q_{kotor} (m ³ /hr)	V_{STP} (m ³)	η_{STP} (hr)	Margin >1,5hr	Status
-------	----------------------------------	-----------------------------	-------------------	---------------	--------

Liberty	132	420	3,18	112,0%	✓ Memadai
Lincoln	118	420	3,56	137,3%	✓ Memadai
Lexington	129	420	3,26	117,3%	✓ Memadai
Empire	99	225	2,28	52,0%	⚠ Monitoring
3L Terpadu	379	420 (bersama)	1,11	-19,7%	⊖ KRITIS



Gambar 4. Evaluasi Rasio STP η_{STP} – Tower Individual dan Sistem Terpadu 3L

3.1.5 Analisis Sistem Kelistrikan dan Load Factor

Analisis kelistrikan diposisikan sebagai bagian integral dari evaluasi sistem plumbing karena sistem air dan energi saling bergantung (*water-energy nexus*). Deviasi daya dihitung menggunakan Persamaan

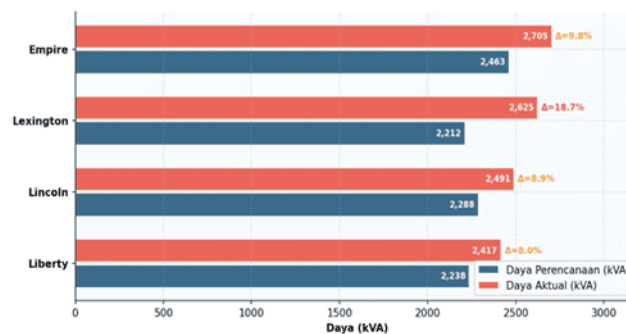
$$\Delta\% = \frac{(Aktual - Perenc)}{perenc} \times 100$$

dan load factor menggunakan Persamaan

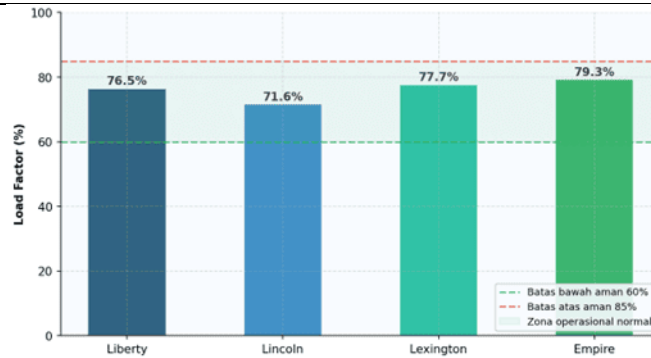
$$LF = \frac{P_{kebutuhan}}{P_{kapasitas}} \times 100.$$

Tabel 9 Rekapitulasi Beban Listrik, Deviasi Daya, dan Load Factor

Tower	Perenc. (kVA)	Aktual (kVA)	Gap (kVA)	Δ (%)	LF (%)	Status Deviasi
Liberty	2.238	2.417	179	8,0%	76,5%	✓ Normal
Lincoln	2.288	2.491	203	8,9%	71,6%	✓ Normal
Lexington	2.212	2.625	413	18,7%	77,7%	⚠ Melebihi toleransi
Empire	2.463	2.705	242	9,8%	79,3%	✓ Normal



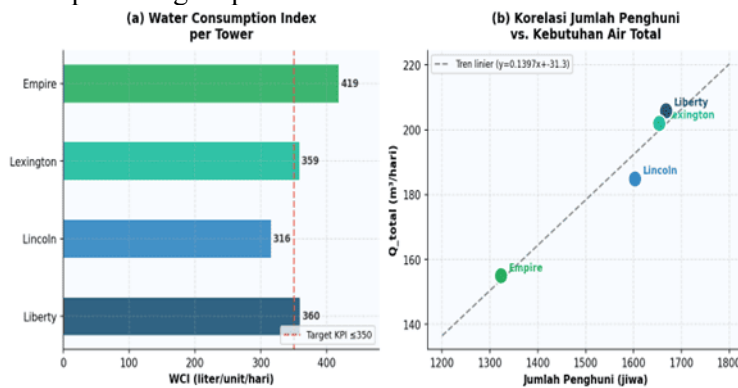
Gambar 5. Perbandingan Daya Perencanaan vs. Aktual dan Deviasi Persentase



Gambar 6. Load Factor Transformator per Tower (Zona Hijau = Operasional Normal 60%–85%)

3.1.6 Water Consumption Index (WCI) dan Analisis Korelasi

WCI digunakan untuk membandingkan intensitas konsumsi air antartower secara setara terlepas dari perbedaan jumlah unit. WCI Tower Empire tertinggi (419 ltr/unit/hr) karena kontribusi signifikan fasilitas pendukung (kolam renang, area komersial = 17,52 m³/hr). Lincoln terendah (316 ltr/unit/hr) karena dominasi unit tipe sedang tanpa beban fasilitas besar.



Gambar 7. Water Consumption Index per Tower dan Korelasi Penghuni vs. Kebutuhan Air

3.1.7 Evaluasi Fixture Units: Hunter Curves vs. Modern Standard

Evaluasi fixture units dilakukan pada Lexington Tower untuk membandingkan pendekatan IPC 2021 konvensional (tanpa perangkat hemat air) dengan pendekatan termodifikasi (modern, dengan perangkat hemat air dual-flush, sensor faucet, shower WaterSense). Adjustment factor ditetapkan berdasarkan spesifikasi teknis produk dan standar EPA *WaterSense*.

Tabel 10 Perbandingan Fixture Units Konvensional vs. Modern per Unit Apartemen

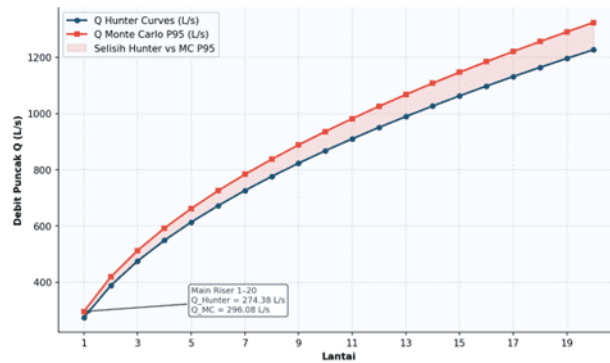
Fixture	Kode	FU/unit IPC	FU Modern	Qty/Apt	FU Trad.	FU Modern	Adj. Factor
WC (Tank)	WC	3,0	2,5	2	6,0	5,0	0,833
Lavatory (Basin)	LAV	1,0	0,75	2	2,0	1,5	0,750
Shower Head	SH	2,0	1,5	2	4,0	3,0	0,750
Kitchen Sink	KS	1,5	1,0	1	1,5	1,0	0,667
Washing Machine	WM	2,0	1,25	1	2,0	1,25	0,625
TOTAL per Apt	–	–	–	8	15,5	11,75	0,758

3.1.8 Perhitungan Debit Puncak – Hunter Curves vs. Monte Carlo P95

Perhitungan debit puncak dilakukan per lantai secara kumulatif dari atas ke bawah untuk Lexington Tower (20 lantai residensial, 8 unit/lantai). FU per lantai = 11,75 FU/apt × 8 apt = 94 FU/lantai.

Tabel 11 Perbandingan Debit Puncak per Lantai – Hunter vs. Monte Carlo P95

Lantai	FU Kumulatif	Q Hunter (L/s)	D Hunter (mm)	Q MC P95 (L/s)	D MC (mm)	DN Nominal (mm)
20 (Top)	94	2,74	37,2	2,96	38,6	40
15	564	6,72	92,1	7,25	95,7	100
10	1.034	9,08	107,0	9,79	111,2	125
5	1.504	10,96	117,7	11,82	122,2	125
3	1.692	11,63	121,4	12,55	126,1	150
2	1.786	11,97	123,1	12,91	127,9	150
1 (Ground)	1.880	12,28	124,9	13,25	129,9	150



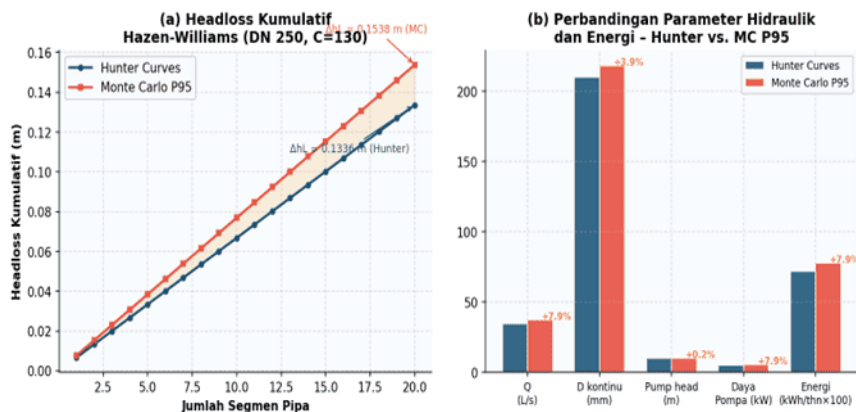
Gambar 8. Kurva Debit Puncak Kumulatif per Lantai – Hunter Curves vs. Monte Carlo P95

3.1.9 Perhitungan Numerik Lengkap: Headloss, Pompa, dan Biaya Energi

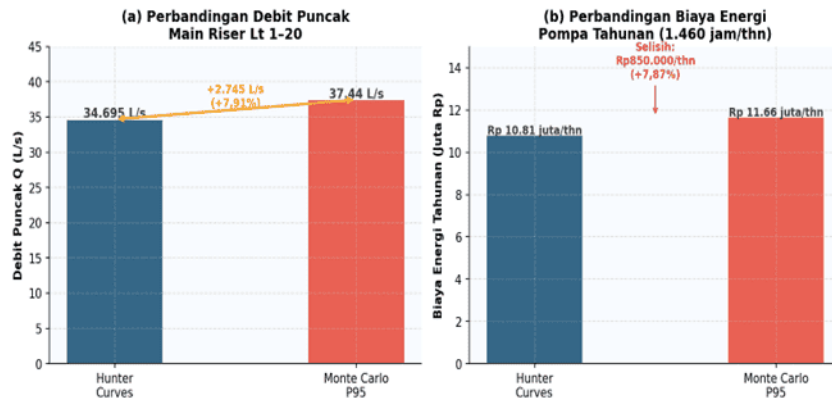
Perhitungan headloss, dimensi pompa, dan biaya energi dilakukan untuk main riser Lt 1–20 dengan data input: $Q_{MC,P95} = 37,44 \text{ L/s} = 0,03744 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{Hunter} = 34,70 \text{ L/s} = 0,03470 \text{ m}^3/\text{s}$; $v = 1,0 \text{ m/s}$; $L \text{ segmen} = 3,0 \text{ m}$; $C = 130$ (pipa baja galvanis); $\eta = 0,70$; $H_{reserve} = 10 \text{ m}$.

Tabel 12 Perbandingan Ringkas Hunter Curves vs. Monte Carlo P95

Indikator	Satuan	Hunter Curves	Monte Carlo P95	Selisih	Relatif (%)
Peak flow Q	L/s	34,695	37,440	+2,745	+7,91%
Diameter kontinu D	mm	210,3	218,4	+8,1	+3,85%
DN Nominal (praktis)	mm	250	250	0	0,00%
h_f per segmen	m/seg	0,00668	0,00769	+0,00101	+15,1%
ΔhL kumulatif 20 seg	m	0,1336	0,1538	+0,0202	+15,1%
Pump head H_{total}	m	10,1336	10,1538	+0,020	+0,20%
Daya pompa P	kW	4,94	5,33	+0,39	+7,91%
Energi tahunan	kWh/thn	7.208	7.774	+566	+7,86%
Biaya energi	Rp/thn	10.812.000	11.662.000	+850.000	+7,87%



Gambar 9. Headloss Kumulatif dan Perbandingan Parameter Pompa – Hunter vs. MC P95



Gambar 10. Debit Puncak dan Biaya Energi Pompa Tahunan – Hunter vs. Monte Carlo P95

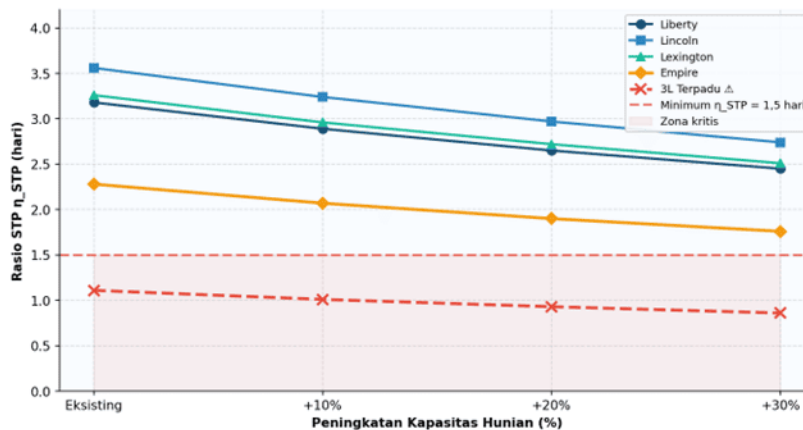
3.1.10 Analisis Sensitivitas Hunian terhadap Rasio STP

Analisis sensitivitas dilakukan untuk menguji ketahanan sistem terhadap skenario peningkatan kapasitas hunian +10%, +20%, dan +30% dari kondisi eksisting. Rasio STP baru dihitung dengan:

$$\eta_{STP, baru} = \frac{V_{STP}}{(Q_{kotor} \times faktor_{kenaikan})}$$

Tabel 13 Analisis Sensitivitas Rasio STP pada Berbagai Skenario Peningkatan Hunian

Tower	Eksisting (hr)	Skenario +10% (hr)	Skenario +20% (hr)	Skenario +30% (hr)	Status
Liberty	3,18	2,89	2,65	2,45	Aman s/d +30%
Lincoln	3,56	3,24	2,97	2,74	Aman s/d +30%
Lexington	3,26	2,96	2,72	2,51	Aman s/d +30%
Empire	2,28	2,07	1,90	1,75	Kritis di +30%
3L Terpadu	1,11	1,01	0,93	0,85	⊖ Kritis saat ini



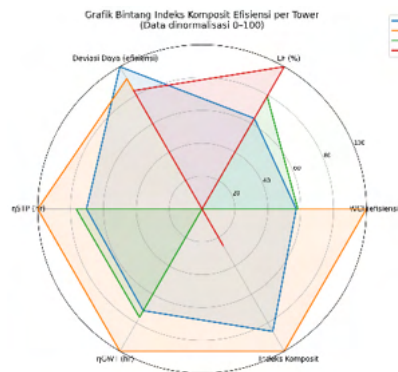
Gambar 11. Analisis Sensitivitas Pengaruh Peningkatan Hunian terhadap Rasio η_{STP}

3.1.11 Indeks Komposit Efisiensi dan Profil Tower

Indeks komposit dikembangkan untuk membaca posisi relatif tiap tower secara sintesis, memadukan empat dimensi efisiensi: konsumsi air (WCI), kelistrikan (LF dan $\Delta\%$), kapasitas pengolahan limbah (η_{STP}), dan penyimpanan air (η_{GWT}). Setiap dimensi dinormalisasi ke skala 0–10 dan dibobot secara merata.

Tabel 14 Indeks Komposit Efisiensi per Tower (Skor 0–100)

Tower	WCI (ltr/unit/hr)	LF (%)	Deviasi Daya (%)	η_{STP} (hr)	η_{GWT} (hr)	Indeks Komposit
Liberty	360	76,5%	8,0%	3,18	11,15	70,5
Lincoln	316	71,6%	8,9%	3,56	12,43	73,4 ★
Lexington	359	77,7%	18,7%	3,26	11,36	52,6 △
Empire	419	79,3%	9,8%	2,28	7,94	58,0



Gambar 12. Analisis Sensitivitas Pengaruh Peningkatan Hunian terhadap

3.1.12 Framework KPI Terintegrasi Sistem Plumbing

Berdasarkan seluruh hasil analisis, penelitian ini merumuskan paket *Key Performance Indicators* (KPI) terintegrasi untuk audit sistem plumbing bangunan tinggi secara berkala. Framework ini menggabungkan empat kelompok KPI yang dikuantifikasi secara eksplisit:

Tabel 15 Framework KPI Terintegrasi Sistem Plumbing Bangunan Tinggi

Kelompok KPI	Indikator	Formula/Metode	Target/Benchmark	Frekuensi Audit
Efisiensi Air	Water Consumption Index	$Q_{total} \div N_{unit}$	≤ 350 ltr/unit/hr	Bulanan
Efisiensi Air	Non-Revenue Water (NRW)	$(Q_{in} - Q_{cons}) / Q_{in} \times 100$	$< 15\%$	Kuartalan
Efisiensi Air	Cadangan GWT	$V_{GWT} \div Q_{eff}$	3–12 hari	Bulanan
Efisiensi Energi	Intensitas energi pompa	$E_{tahunan} / V_{terpompa}$	$\leq 1,5$ kWh/m ³	Kuartalan
Efisiensi Energi	Load factor trafo	$P_{kebt} \div P_{kaps} \times 100$	60%–85%	Bulanan
Efisiensi Energi	Deviasi daya	$(Akt - Perenc.) / Perenc. \times 100$	$< 10\%$	Tahunan
Kualitas Hidraulik	Tekanan zona kritis	% jam tekanan ≥ 2 bar	$> 95\%$ waktu	Mingguan
Kualitas Hidraulik	Rasio STP	$V_{STP} \div Q_{kotor}$	$\geq 1,5$ hari	Bulanan
Kenyamanan Pengguna	Skor tekanan air	Survei Likert 1–5	$\geq 4,0$	Semesteran
Kenyamanan Pengguna	Skor kualitas air	Survei Likert 1–5	$\geq 4,0$	Semesteran

3.2 Pembahasan: *Water-Energy Nexus* dan Implikasi Manajerial

Temuan penelitian ini mengonfirmasi keterkaitan erat antara sistem air dan energi (*water-energy nexus*) pada bangunan tinggi. Tower Lexington adalah contoh nyata: deviasi daya 18,7% tidak semata-mata disebabkan oleh estimasi kelistrikan yang keliru, melainkan juga mencerminkan underestimate beban operasional pompa akibat pertumbuhan hunian melampaui proyeksi awal. Ini mengukuhkan bahwa desain sistem plumbing dan kelistrikan harus dilakukan secara terpadu. Perbandingan Hunter Curves vs. Monte Carlo P95 menunjukkan bahwa Hunter memberikan estimasi 7,91% lebih rendah. Meskipun keduanya berakhir pada DN nominal yang sama (DN 250), model MC P95 memberikan jaminan bahwa sistem mampu menanggung beban puncak pada 95% kondisi operasional. Tambahan biaya energi Rp 850.000/tahun adalah biaya asuransi sistem yang sangat

kecil dibandingkan potensi kerugian dari gangguan suplai air pada ratusan penghuni. Titik kritis utama penelitian ini adalah STP terpadu Tower 3L dengan $\eta_{STP} = 1,11$ hari, di bawah minimum 1,5 hari. Solusi yang direkomendasikan:

1. peningkatan kapasitas STP dari 420 m³ menjadi minimal 570 m³ (biaya investasi ~Rp2,8–3,5 miliar),
2. implementasi sistem daur ulang greywater untuk mengurangi beban Q_{kotor} sebesar 15–20%, atau
3. optimasi operasional melalui penjadwalan tiang pembebanan STP di luar jam puncak. Opsi (2) paling efisien secara ekonomi karena greywater yang didaur ulang dapat digunakan untuk flushing toilet, mengurangi WCI sekaligus menurunkan beban STP.

4. KESIMPULAN

1. Total kebutuhan air keempat tower mencapai 748 m³/hari (efektif 599 m³/hari). Seluruh tower memiliki cadangan GWT sangat memadai (7,94–12,43 hari, jauh melampaui minimum 3 hari SNI), mengindikasikan konservatisme desain tinggi dengan peluang optimasi investasi tinggi.
2. Titik kritis utama pada STP terpadu Tower 3L dengan $\eta_{STP} = 1,11$ hari (di bawah minimum 1,5 hari). Sistem memerlukan intervensi segera: peningkatan kapasitas STP atau implementasi daur ulang greywater. Tower Empire juga memerlukan monitoring ketat ($\eta_{STP} = 2,28$ hari, akan kritis pada skenario +30% hunian). Deviasi daya terbesar pada Tower Lexington (18,7%), melebihi toleransi 10%, mengindikasikan underestimate perencanaan akibat pertumbuhan hunian. Load factor seluruh tower berada dalam zona normal (71,6%–79,3%), namun Lexington berpotensi mendekati batas atas pada skenario hunian penuh.
3. Metode Hunter Curves menghasilkan estimasi debit puncak 7,91% lebih rendah dari Monte Carlo P95 (34,695 vs 37,440 L/s). Meski keduanya berakhir pada DN nominal sama (DN 250 mm), MC P95 memberikan keandalan lebih tinggi dengan tambahan biaya energi hanya Rp850.000/tahun (+7,87%). Penerapan perangkat hemat air mereduksi FU sebesar 24,2% (residensial) dan 43% (komersial).
4. 5. Framework KPI terintegrasi 4 kelompok (efisiensi air, efisiensi energi, kualitas hidraulik, kenyamanan pengguna) yang dirumuskan menyediakan alat audit berkala yang operasional. Implementasi VFD, zoning PRV, dan program deteksi kebocoran aktif berpotensi menurunkan konsumsi air 15–30% dan konsumsi energi pompa 10–25%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Podomoro City Deli Medan dan PT Dwi Putera Adiyasa Consultant sebagai team Mekanikal SLF . Program Studi Teknik mesin dan LPPM Universitas Al Azhar Medan yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. S. Mutaqi, P. Salura, and R. C. Lake, “Ensuring Fairness: Strategies for Providing Affordable Housing for Low-Income Communities in Urban Indonesia,” *EMARA Indones. J. Archit.*, vol. 9, no. 1, pp. 46–57, 2024, doi: 10.29080/eija.v9i1.2085.
- [2] U. Mehmood, U. Ujang, S. Azri, and T. L. Choon, “A temporal post-occupancy risks management model for high-rise strata via 3D city modelling approach,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1412, no. 1, pp. 1–11, 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1412/1/012034.
- [3] B. Tchórzewska-Cieślak and K. Pietrucha-Urbanik, “Water System Safety Analysis Model,” *Energies*, vol. 16, no. 6, p. 2809, 2023, doi: 10.3390/en16062809.

- [4] M. R. Torkomany, H. S. Hassan, A. Shoukry, M. Hussein, C. Yoshimura, and M. Elkholy, "Investigation of Optimum Sustainable Designs for Water Distribution Systems from Multiple Economic, Operational, and Health Perspectives," *Sustain.*, vol. 15, no. 2, pp. 1–17, 2023, doi: 10.3390/su15021576.
- [5] J. Zheng, H. Li, L. Sun, M. Li, and Y. Zhang, "Optimizing the Food–Energy–Water Nexus: A Multi-Objective Spatial Configuration Framework for High-Density Communities," *Buildings*, vol. 15, no. 13, 2025, doi: 10.3390/buildings15132196.
- [6] A. Asyraf and S. D. Andrea, "Passive Design Strategy of Vertical Housing for Optimizing Energy Efficiency," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1404, no. 1, pp. 1–9, 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1404/1/012014.
- [7] P. Cortez-Lara, E. S. Hernández Gress, R. Ballinas-Gonzalez, and B. Sanchez, "A methodology to simulate peak water demand for water supply systems using semi-direct methods: A case study for a residential building in Mexico," *Heliyon*, vol. 10, no. 3, pp. 1–14, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e25104.
- [8] D. M. Sari and M. R. Ismail, "Strategic Planning of Urban Water Supply Systems in Responses to Rapid Urbanization: A Case Study of Bandar Lampung, Indonesia," *J. Eng. Innov. Manag. Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 40–49, 2025, doi: 10.64780/jeims.v1i1.4.
- [9] B. M. Josey, S. G. Buchberger, and J. Gong, "Comparing Actual and Designed Water Demand in Australian Multilevel Residential Buildings," *J. Water Resour. Plan. Manag.*, vol. 149, no. 1, pp. 1–12, 2023, doi: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001625.
- [10] Z. H. Siregar, A. F. Nasution, Mawardi, Refiza, and Suherman, "Evaluasi Kritis dan Model Alternatif Hunter Curves untuk Sistem Plumbing Gedung Bertingkat di Medan," *J. Mekanova Mek. Inov. dan Teknol.*, vol. 11, no. 2, pp. 205–217, 2025, doi: 10.35308/jmkn.v11i2.13638.
- [11] E. Calle *et al.*, "Optimal design of water reuse networks in cities through decision support tool development and testing," *npj Clean Water*, vol. 6, no. 1, pp. 1–23, 2023, doi: 10.1038/s41545-023-00222-4.
- [12] A. A. Bin Mahmoud, A. Momeni, and K. R. Piratla, "Optimal Near Real-Time Control of Water Distribution System Operations," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 7, pp. 1–16, 2023, doi: 10.3390/w15071280.
- [13] C. C. Nnaji, U. U. Udokpoh, and A. R. Ifeakor, "Assessing the efficiencies of domestic water pumps and distribution systems for household water supply in Enugu State, Nigeria," *Indian J. Eng.*, vol. 21, no. 55, 2024, doi: 10.54905/diss.v21i55.e5ije1680.
- [14] L. Tong, J. Zou, J. Tao, and X. Cao, "Study on heat removal capacity of PCCS of advanced passive PWR during severe accidents," *Nucl. Technol.*, vol. 191, no. 1, pp. 15–26, 2015, doi: 10.13182/NT14-93.
- [15] R. Olu-Ajayi, H. Alaka, H. Owolabi, L. Akanbi, and S. Ganiyu, "Data-Driven Tools for Building Energy Consumption Prediction: A Review," *Energies*, vol. 16, no. 6, pp. 1–20, 2023, doi: 10.3390/en16062574.
- [16] M. Rezvanpour and Y. Chen, "Space Cooling Energy Potential of Domestic Cold Water before Household Consumption in Cold-Climate Regions," *Buildings*, vol. 13, no. 6, p. 1491, 2023, doi: 10.3390/buildings13061491.
- [17] P. Moriarty and D. Honnery, "Rethinking Notions of Energy Efficiency in a Global Context," *Energies*, vol. 16, no. 12, p. 4706, 2023, doi: 10.3390/en16124706.
- [18] N. S. Al-Amri, H. A. Ewea, and A. M. Elfeki, "Stochastic Rational Method for Estimation

- of Flood Peak Uncertainty in Arid Basins: Comparison between Monte Carlo and First Order Second Moment Methods with a Case Study in Southwest Saudi Arabia,” *Sustain.*, vol. 15, no. 6, p. 4719, 2023, doi: 10.3390/su15064719.
- [19] M. Bacci, J. Sukys, P. Reichert, S. Ulzega, and C. Albert, “A comparison of numerical approaches for statistical inference with stochastic models,” *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, vol. 37, no. 8, pp. 3041–3061, 2023, doi: 10.1007/s00477-023-02434-z.
- [20] L. Li, B. Ni, Y. Qiang, S. Zhang, D. Zhao, and L. Zhou, “Risk assessment of debris flow disaster based on the cloud model—Probability fusion method,” *PLoS One*, vol. 18, no. 2 February, pp. 1–18, 2023, doi: 10.1371/journal.pone.0281039.
- [21] E. Dąbrowska, “Oil Discharge Trajectory Simulation at Selected Baltic Sea Waterway under Variability of Hydro-Meteorological Conditions,” *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 10, p. 1957, 2023, doi: 10.3390/w15101957.
- [22] K. Joseph, A. K. Sharma, R. van Staden, P. L. P. Wasantha, J. Cotton, and S. Small, “Application of Software and Hardware-Based Technologies in Leaks and Burst Detection in Water Pipe Networks: A Literature Review,” *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 11, p. 2046, 2023, doi: 10.3390/w15112046.
- [23] C. Turhan, A. S. Atalay, and G. Gokcen Akkurt, “An Integrated Decision-Making Framework for Mitigating the Impact of Urban Heat Islands on Energy Consumption and Thermal Comfort of Residential Buildings,” *Sustain.*, vol. 15, no. 12, p. 9674, 2023, doi: 10.3390/su15129674.
- [24] X. Yang, Z. Gou, and H.-W. Chau, “A decision framework for multi-dimensional analysis of roof retrofit scenarios to mitigate urban heat Island effects and enhance energy efficiency,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 130, p. 106591, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106591>.
- [25] G. Bekdaş, Y. Aydın, Ü. Isıkdağ, A. N. Sadeghifam, S. Kim, and Z. W. Geem, “Prediction of Cooling Load of Tropical Buildings with Machine Learning,” *Sustain.*, vol. 15, no. 11, p. 9061, 2023, doi: 10.3390/su15119061.
- [26] Y. Chen and J. Gaspari, “Exploring an Integrated System for Urban Stormwater Management: A Systematic Literature Review of Solutions at Building and District Scales,” *Sustain.*, vol. 15, no. 13, p. 9984, 2023, doi: 10.3390/su15139984.
- [27] M. Marzouk and R. Thabet, “A BIM-Based Tool for Assessing Sustainability in Buildings Using the Green Pyramid Rating System,” *Buildings*, vol. 13, no. 5, p. 1274, 2023, doi: 10.3390/buildings13051274.
- [28] Q. Cao, J. Cao, and R. Xu, “Optimizing Low Impact Development for Stormwater Runoff Treatment: A Case Study in Yixing, China,” *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 5, p. 989, 2023, doi: 10.3390/w15050989.
- [29] F. M. Amoruso and T. Schuetze, “Carbon Life Cycle Assessment and Costing of Building Integrated Photovoltaic Systems for Deep Low-Carbon Renovation,” *Sustain.*, vol. 15, no. 12, p. 9460, 2023, doi: 10.3390/su15129460.
- [30] S. Wang, H. Yang, and Y. Zhang, “Multi-phase optimization framework of residential blocks: Balancing building energy consumption, solar energy potential, and outdoor thermal comfort,” *Energy Build.*, vol. 356, p. 117074, 2026, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2026.117074>.
- [31] Z. H. Siregar *et al.*, “Optimalisasi sistem plumbing hemat air di Rusun Brimob Sampali Medan: edukasi teknologi dan manajemen limbah cair,” *J. Derma Pengabd. Dosen Perguru. Tinggi (Jurnal DEPUTI)*, vol. 5, no. 1, pp. 329–340, 2025, doi:

10.54123/deputi.v5i1.399.

- [32] M. Abugabbara, J. Lindhe, S. Javed, D. Johansson, and J. Claesson, “Comparative study and validation of a new analytical method for hydraulic modelling of bidirectional low temperature networks,” *Energy*, vol. 296, no. August 2023, p. 131168, 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.131168.
- [33] M. Lazarevikj, R. Koleva, E. Zaevev, D. Babunski, and Z. Markov, “A Review of Modeling Approaches and Key Parameters in the Simulation of Wastewater Treatment Plants,” *Water*, vol. 18, no. 2, p. 266, 2026, doi: 10.3390/w18020266.
- [34] Z. H. Siregar *et al.*, “Pelatihan dan implementasi perencanaan pencahayaan dan sirkulasi udara untuk lingkungan sehat dan nyaman pada Proyek Pembangunan Gedung UMKM-USU,” *J. Derma Pengabd. Dosen Perguru. Tinggi (Jurnal DEPUTI)*, vol. 4, no. 2, pp. 299–304, 2024, doi: 10.54123/deputi.v4i2.363.
- [35] R. Zevenhoven and Ö. Arnas, “The effect of air humidity on the exergy efficiency of domestic heat pumps,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 221, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113054.
- [36] R. Ballinas-gonzalez, P. Cortez-lara, E. Selene, and B. Sanchez, “Heliyon A methodology to simulate peak water demand for water supply systems using semi-direct methods : A case study for a residential building in Mexico,” *Heli*, vol. 10, no. July 2023, p. e25104, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e25104.
- [37] C. Mera-parra and H. M. Benavides-muñoz, “Empirical Recalibration of Hunter ’ s Method for Peak Flow Estimation in Institutional Buildings : A Pilot Study in Data-Scarce Contexts,” *Water*, vol. 17, no. 22, pp. 1–18, 2025, doi: 10.3390/w17223233.
- [38] S. Costa, I. Meireles, and V. Sousa, “Understanding residential water demand : insights from a survey in a Mediterranean city,” *Urban Water J.*, vol. 21, no. 4, pp. 521–537, 2024, doi: 10.1080/1573062X.2024.2312501.
- [39] J. J. Balilemwa, N. R. Jamil, N. M. Isa, Z. Zainudin, and S. Sapiaea, “Optimising load allocation and reduction strategies for sewage treatment plants in urban tropical rivers : Modelling with QUAL2K and GIS,” *Sci. Rep.*, vol. 1, no. 15, pp. 0–28, 2026, doi: 10.1038/s41598-026-46763-9.
- [40] C. J. Carrasco-Ahen, J. Quintasi-Quispe, G. Palacios-Ticona, and H. De Gracia, “Efficient technologies for optimizing water use in multifamily buildings,” *J. Environ. Sci. Heal. Part A*, vol. 60, no. 10, pp. 545–553, Aug. 2025, doi: 10.1080/10934529.2025.2608536.
- [41] G. P. Barrera Castro, A. Chiappe, D. F. Becerra Rodríguez, and F. Sepúlveda, “Artificial Intelligence and Learning Gaps: Evaluating the Effectiveness of Personalized Pathways,” *Appl. Sci.*, vol. 16, no. 3, pp. 1–24, 2026, doi: 10.3390/app16031302.
- [42] I. Al-Dhahir *et al.*, “Content evaluation of the inclusive eHealth guide: how to develop interventions for people with a lower socioeconomic position?,” *Front. Digit. Heal.*, vol. 7, no. October, pp. 1–18, 2025, doi: 10.3389/fdgth.2025.1528860.