

Evaluasi Kritis dan Model Alternatif Hunter Curves untuk Sistem Plumbing Gedung Bertingkat di Medan

Zufri Hasrudy Siregar^{*1}, Arif Fadillah Nasution², Mawardi³, Refiza⁴, Suherman⁵

^{1,2,3}Prodi Teknik Mesin, Universitas Al-Azhar Medan, Jl. Pintu Air IV No. 214 Kwala Bekala,
Padang Bulan, Medan, Sumatera Utara, Indonesia

⁴Prodi Teknik Industri, Universitas Al-Azhar Medan, Jl. Pintu Air IV No. 214 Kwala Bekala, Padang
Bulan, Medan, Sumatera Utara, Indonesia

⁵Prodi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Jl. Kapt. Mukhtar Basri No. 3
Medan Sumatera Utara 20238 Indonesia.

e-mail: ^{*1} rudysiregar7@gmail.com,

Abstrak

Air bersih merupakan kebutuhan fundamental dalam gedung bertingkat, sehingga perhitungan kebutuhan air puncak (peak demand) menjadi aspek kritis dalam desain sistem plumbing. Selama ini, perencana di Indonesia masih mengandalkan Hunter Curves (1940), metode klasik yang dikembangkan di Amerika Serikat dan telah digunakan selama lebih dari delapan dekade. Metode Hunter tidak lagi relevan karena pola konsumsi air telah berubah, penggunaan perangkat hemat air semakin meluas, dan karakteristik gedung tropis di Indonesia berbeda dengan asumsi dasar Hunter. Penelitian ini mengevaluasi secara kritis Hunter Curves melalui studi kasus Gedung Podomoro Lexington Tower Medan (20 lantai, 160 unit) dengan membandingkan metode Hunter dan model alternatif berbasis simulasi probabilistik Monte Carlo (P95) yang dikalibrasi secara lokal. Simulasi Monte Carlo dilakukan sebanyak 10.000 iterasi menggunakan pemodelan stokastik berbasis MATLAB untuk memperoleh distribusi debit puncak. Hasil menunjukkan debit puncak menurut Hunter sebesar 34,695 L/s, sedangkan model alternatif mencapai 37,440 L/s (+7,91%). Perbedaan ini memengaruhi dimensi pipa dan daya pompa, namun biaya tambahan energi (±Rp850.000/tahun) sepadan dengan peningkatan keandalan sistem. Penelitian ini menegaskan bahwa Hunter Curves sudah usang dan perlu digantikan oleh pendekatan yang lebih akurat, efisien energi, dan berkelanjutan.

Kata kunci: Plumbing, Hunter Curves, Monte Carlo, Energy Efficiency, Water Demand Modeling

Abstract

Clean water is a fundamental necessity in high-rise buildings, so calculating peak water demand is a critical aspect of plumbing system design. So far, planners in Indonesia still rely on Hunter Curves (1940), a classic method developed in the United States and has been used for more than eight decades. The Hunter method is no longer relevant because water consumption patterns have changed, the use of water-saving devices is becoming more widespread, and the characteristics of tropical buildings in Indonesia are different from Hunter's basic assumptions. This study critically evaluates Hunter Curves through a case study of the Lexington Tower Medan Healthcare Building (20 floors, 160 units), comparing the Hunter method with an alternative model based on a locally calibrated Monte Carlo probabilistic simulation (P95). Monte Carlo simulations were performed in 10,000 iterations using MATLAB-based stochastic modeling to obtain peak discharge distributions. The results showed a peak discharge according to Hunter of 34,695 L/s, while the alternative model reached 37,440 L/s (+7.91%). This difference affects the pipe dimensions and

pump power, but the additional energy cost ($\pm$ Rp850,000/year) is commensurate with the increased reliability of the system. This study confirms that Hunter Curves are obsolete and need to be replaced by a more accurate, energy-efficient, and sustainable approach.

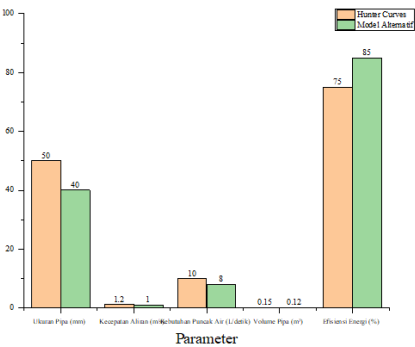
Keywords: Plumbing, Hunter Curves, Monte Carlo, Energy Efficiency, Water Demand Modeling

1. PENDAHULUAN

Sistem pipa di gedung-gedung bertingkat tinggi di Indonesia masih mengandalkan teknik perencanaan yang ketinggalan zaman [1][2], khususnya kurva *Hunter* yang dibuat pada tahun 1940 [3]. Teknik ini memperkirakan kebutuhan air berdasarkan unit perlengkapan, tetapi tidak selaras dengan tren penggunaan air modern yang lebih efisien, seperti adopsi perangkat hemat air [4][3]. Akibatnya, desain pipa cenderung lebih besar dari yang dibutuhkan, yang menyebabkan pemborosan energi, peningkatan biaya konstruksi, dan potensi risiko kesehatan dari genangan air di pipa [5][6][7]. Oleh karena itu, sangat penting untuk menilai dan menciptakan model alternatif yang lebih efisien yang disesuaikan dengan konteks lokal di Indonesia.

Tabel 1 perbandingan antara perencanaan menggunakan kurva Hunter dengan model alternatif

Parameter	Hunter Curve (Standar)	Model Alternatif (Proposed)
Ukuran Pipa (mm)	50	40
Kecepatan Aliran (m/s)	1.2	1.0
Kebutuhan Puncak Air (L/detik)	10	8
Volume Pipa (m ³)	0.15	0.12
Efisiensi Energi (%)	75	85
Estimasi Pemborosan (Rp)	50.000.000	40.000.000



Gambar 1. Perbandingan antara perencanaan menggunakan kurva Hunter dengan model alternatif

Tabel di atas menunjukkan perbandingan antara perencanaan menggunakan kurva Hunter dengan model alternatif yang lebih efisien, di mana model alternatif diharapkan dapat mengurangi pemborosan energi dan biaya operasional [8]. Penggunaan *Hunter Curves* dalam perencanaan sistem plumbing gedung bertingkat sering kali tidak akurat, terutama pada gedung modern dengan peralatan hemat air [9]. [10] mengkritisi bahwa kurva Hunter memberikan estimasi yang lebih tinggi dibandingkan kebutuhan air nyata. [11] juga menunjukkan bahwa kurva ini kurang relevan di Indonesia, mengingat penggunaan teknologi hemat air yang semakin berkembang [12]. Sebagai

alternatif, [13] mengembangkan model berbasis regresi dan *machine learning* yang lebih akurat dalam memperkirakan kebutuhan air. [14] juga menemukan bahwa IAPMO *Water Demand Calculator* (WDC) lebih efisien dibandingkan dengan *Hunter Curves* [15]. Namun, penerapan model ini di Indonesia masih terbatas, sehingga penelitian ini penting untuk mengembangkan model yang sesuai dengan kondisi lokal.

Dalam beberapa tahun terakhir, munculnya konsep *Smart Plumbing* dan *Digital Twin* telah menjadi trend penting dalam pengelolaan sistem perpipaan dan instalasi air di gedung modern. *Smart Plumbing* memanfaatkan sensor-*IoT*, pemantauan *real-time*, dan kontrol otomatis untuk mendeteksi kebocoran, mengoptimalkan penggunaan air, dan meningkatkan efisiensi operasional [16]. Sementara itu, *Digital Twin* yakni replika virtual dari sistem fisik yang diperbarui secara terus-menerus memungkinkan simulasi, analisis skenario “*what-if*”, serta perawatan prediktif berdasarkan data aktual dari sensor. Teknologi ini telah digunakan di banyak negara dan mulai diadopsi di Indonesia, terutama dalam proyek pembangunan dan manajemen fasilitas gedung, untuk meminimalisir pemborosan air, meningkatkan keandalan sistem, dan mengurangi biaya operasional jangka panjang [17]. Dengan demikian, integrasi *Smart Plumbing* dan *Digital Twin* menawarkan kerangka kerja yang lebih maju dibandingkan pendekatan konvensional seperti *Hunter Curves*, karena tidak hanya memperhitungkan data historis atau asumsi probabilistik, tetapi juga data operasional nyata dan dinamika sistem [18].

Penelitian ini menyoroti ketidakakuratan penggunaan *Hunter Curves* dalam perencanaan sistem plumbing pada gedung bertingkat di Indonesia [9]. Metode ini sering menghasilkan estimasi kebutuhan air yang terlalu besar, terutama pada bangunan yang sudah menggunakan peralatan hemat air. Akibatnya, terjadi pemborosan energi, peningkatan biaya konstruksi, serta risiko kesehatan yang muncul akibat stagnasi air dalam pipa.[19][20][21]. Tujuan utama penelitian ini adalah mengevaluasi keterbatasan *Hunter Curves* sekaligus mengembangkan model alternatif yang lebih efisien dan sesuai dengan kondisi nyata di Indonesia. Kontribusi ilmiah yang diberikan adalah pengembangan model perencanaan sistem plumbing yang memperhitungkan keberadaan perangkat hemat air dan pola konsumsi modern yang lebih efisien [22][23]. Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan mampu mengurangi pemborosan sumber daya, menekan biaya operasional, serta meningkatkan keberlanjutan sistem *plumbing* di gedung bertingkat. Bagi industri konstruksi, hasil penelitian ini dapat menjadi panduan dalam merancang sistem distribusi air yang lebih efisien, hemat energi, dan ramah biaya [24]. Bagi pemerintah, penelitian ini mendukung upaya penerapan kebijakan pembangunan gedung berkelanjutan. Sedangkan bagi masyarakat, manfaat yang diperoleh berupa penghematan biaya penggunaan air, kualitas layanan air yang lebih baik, serta berkurangnya risiko kesehatan akibat masalah stagnasi air dalam pipa.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan evaluatif-komparatif dengan metode simulasi numerik dan analisis model matematis [25][26]. Tujuan utamanya adalah membandingkan hasil perhitungan debit puncak (*peak demand*) antara metode *Hunter Curves* dan model probabilistik Monte Carlo (P95) yang dikalibrasi sesuai kondisi lokal Indonesia. Pendekatan evaluatif digunakan untuk menilai tingkat akurasi dan keterbatasan *Hunter Curves*, sedangkan pendekatan komparatif digunakan untuk menganalisis perbedaan hasil antara kedua metode. Simulasi Monte Carlo dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB R2023a, dengan 10.000 iterasi stokastik untuk menghasilkan distribusi probabilitas debit puncak [27]. Validasi numerik dilakukan dengan cross-check terhadap data empiris hasil pengukuran debit aktual di lapangan menggunakan *flow meter* [28].

2.2. Persamaan dan Model Matematis

Penelitian ini menggunakan dua kelompok persamaan utama:

a. Persamaan dasar Hunter Curves untuk menghitung debit puncak:

$$Q = 0.0283\sqrt{FU} \dots\dots\dots(1)$$

Dimana Q = debit puncak (m³/s) dan FU = total fixture units

b. Persamaan aliran kontinu (persamaan kontinuitas):

$$Q = A \times v \dots\dots\dots(2)$$

Dengan A= luas penampang pipa (m³) dan v = kecepatan aliran (m/s);

c. Persamaan diameter pipa (kontinu):

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}} \dots\dots\dots(3)$$

d. Persamaan Hazen-Williams (SI Form):

$$h_f = 10.67 \times L \times \left(\frac{Q^{1.852}}{C^{1.852} D^{4.871}} \right) \dots\dots\dots(4)$$

Dengan h_f = kehilangan tekanan (m), L = panjang pipa (m), C = koefisien kekerasan (110-150)

e. Persamaan head total istem :

$$H_{total} = h_f + H_{static} + H_{reserve} \dots\dots\dots(5)$$

f. Persamaan daya pompa:

$$P = \frac{\rho g Q H_{total}}{\eta} \dots\dots\dots(6)$$

Dimana ρ = densitas air (1000 kg/m³), g = percepatan gravitasi (9,81 m/s²), dan η = efisiensi pompa (0.7-0.85)

g. Persamaan konversi energi tahunan :

$$E_{year} = P \times t \dots\dots\dots(7)$$

Dengan t = waktu operasi tahunan (jam/tahun)

h. Persamaan biaya energi tahunan:

$$C_{energy} = E_{year} \times Tariff \dots\dots\dots(8)$$

i. Model probabilistik Monte Carlo :

$$Q_i = f(FU_i, X_i) \dots\dots\dots(9)$$

Dimana X_i adalah variabel acak dari distribusi lognormal yang mewakili variasi penggunaan air antr unit.

j. Distribusi hasil simulasi

$$Q_{p95} = \mu Q + 1.645 \sigma Q \dots\dots\dots(10)$$

$$1 \frac{ft^3}{s} = 0.283 \frac{m^3}{s}$$

k. Perhitungan efisiensi energi sistem :

$$\eta_{sys} = \frac{Q_{actual}}{Q_{theoretical}} \times 100\% \dots\dots\dots(11)$$

2.3 Lokasi dan Lingkup Penelitian

Lingkup penelitian ini mencakup sistem plumbing pada gedung bertingkat di Medan, dengan fokus pada bangunan komersial dan residensial yang memiliki minimal 10 lantai. Data penelitian diperoleh dari sumber sekunder yang meliputi:

- Standar Nasional Indonesia (SNI) terkait sistem plumbing dan penyediaan air bersih
- International Plumbing Code (IPC) dan ASHRAE Handbook
- Data konsumsi air dari PDAM wilayah perkotaan Indonesia (Jakarta, Medan, Surabaya)
- Literatur teknis mengenai *Hunter Curves* dan model perencanaan plumbing modern
- Spesifikasi teknis peralatan plumbing hemat air yang tersedia di pasar Indonesia

Studi kasus tambahan dilakukan pada gedung PODOMORO di Kota Medan sebagai representasi

karakteristik penggunaan air di Indonesia.



Gambar 1 Podomoro Medan

2.4 Populasi dan Sampel / Objek Penelitian

Objek penelitian adalah sistem pipa distribusi air pada gedung bertingkat dengan karakteristik sebagai berikut:

- Gedung bertingkat tinggi (>10 lantai)
- Menggunakan sistem plumbing bertekanan
- Dilengkapi dengan *fixture modern* dan peralatan hemat air
- Memiliki beban puncak air yang bervariasi sesuai fungsi gedung (komersial, residensial, atau *mixed-use*)

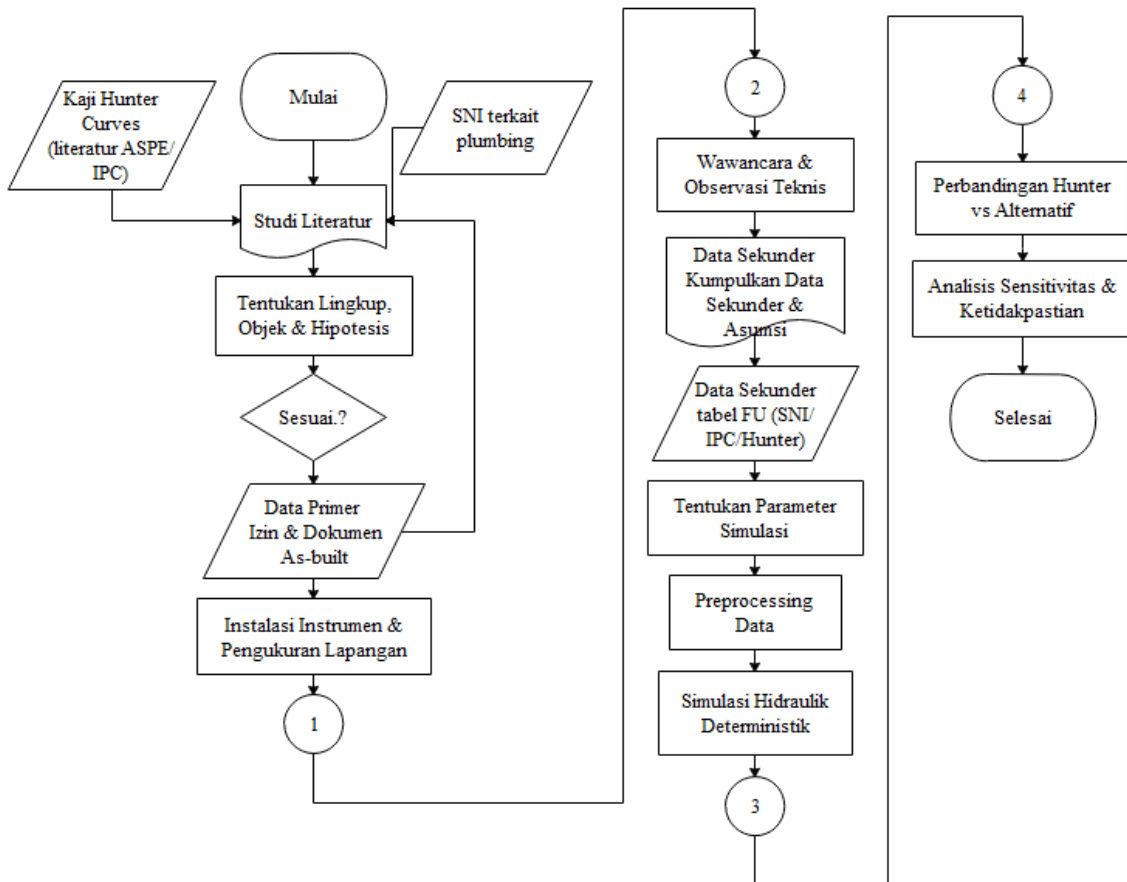
Parameter simulasi yang digunakan meliputi:

- Jumlah lantai : 10, 15, 20, dan 25 lantai
- Jumlah unit fixture : 50-500 *fixture units*
- Jenis fixture: wastafel, kloset hemat air (*dual-flush*), shower hemat air, urinal waterless
- Beban puncak air : 5-15 L/detik
- Tekanan kerja sistem : 2-6 bar
- Pola penggunaan: residensial (pagi dan sore), komersial (jam kerja), dan *mixed-use*

2.3 Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui beberapa tahap:

- Data Sekunder:
 - ✓ Literatur teknis mengenai *Hunter Curves* dari publikasi ASPE (*American Society of Plumbing Engineers*) dan ASHRAE
 - ✓ Standar perencanaan plumbing SNI 03-7065-2005 dan IPC 2021
 - ✓ Data konsumsi air per kapita dari PDAM dan Kementerian PUPR
 - ✓ Spesifikasi teknis fixture hemat air dari katalog produk
- Data Primer (Studi Kasus):
 - ✓ Observasi lapangan pada gedung PODOMRO di Medan untuk mengukur debit aktual dan pola penggunaan air
 - ✓ Wawancara dengan konsultan MEP (Mechanical, Electrical, Plumbing) dan kontraktor plumbing untuk mendapatkan data empiris
 - ✓ Pengukuran tekanan dan debit pada jam puncak menggunakan *flow meter* dan *pressure gauge*



Gambar 3. Flowchart Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Tahap Evaluasi Teori Hunter Curves

Penelitian ini mengevaluasi kesesuaian teori *Hunter Curves* untuk penentuan dimensi pipa pada sistem plumbing gedung bertingkat dan mengembangkan model alternatif berbasis simulasi probabilistik (*Monte Carlo*) [29] serta optimasi sizing hidraulik. Studi kasus yang dianalisis adalah Gedung Podomoro Lexington Tower (20 lantai hunian; 8 unit per lantai; total 160 unit)

$$FU = \sum_{i=1}^n (N_i \times FU_i) \dots \dots \dots (1)$$

Tabel 2 Perhitungan *Fixture Units* Residensial

Fixture Type	Kode	FU per Unit(IPC 2021)	FU Adjusted (Modern)	Qty per Apt	Total FU Traditional	Total FU Modern	Adjustment Factor
Water Closet (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 Apartment			-8		15.5	11.75	0.758

Perhitungan untuk 1 Tower (200 unit):

$$FU_{total_traditional} = 15.5 \times 200 = 3,100 \text{ FU}$$

$$FU_{total_modern} = 11.75 \times 200 = 2,350 \text{ FU}$$

$$Reduction = \frac{(3,100 - 2,350)}{3,100} \times 100\% = 24.2\%$$

Tabel 3 Perhitungan *Fixture Units* Komersial

Fixture Type	Kode	FU per Unit (IPC 2021)	FU Adjusted (Modern)	Qty per Apt	Total FU Traditional	Total FU Modern	Adjustment Factor
Water Closet (Flush Valve)	WC-FV	4.0	2.5	8	32.0	20.0	0.625
Urinal (1.0 gpf)	UR	2.0	1.0	4	8.0	4.0	0.500
Lavatory (Sensor)	LA-S	1.0	0.5	8	8.0	4.0	0.500
Service Sink	SS	2.0	1.0	4	8.0	4.0	0.500
Drinking Fountain	DF	0.5	0.25	2	1.0	0.5	0.500
TOTAL per Apartment			-26		57.0	32.5	0.570

Perhitungan untuk Office Tower (18 lantai):

$$FU_{total_traditional} = 57.0 \times 18 = 1,026 \text{ FU}$$

$$FU_{total_modern} = 32.5 \times 18 = 585 \text{ FU}$$

$$Reduction = \frac{(1,026 - 585)}{1,026} \times 100\% = 43\%$$

3.2 Perhitungan Debit Puncak Metode Hunter

$$Q = 0.0281 \cdot FU^{0.45}, (FU > 1000)$$

Dimana:

Q = Debit puncak (m³/s)

FU = Total fixture units

0.0283 = Konstanta konversi (1 ft³/s = 0.0283 m³/s)

$$Q \left(\frac{l}{s} \right) = Q \left(\frac{m^3}{s} \right) \times 1000$$

Tabel 4 Perhitungan Debit Hunter Komersial (*Office Tower*)

Zona Vertikal	Lantai	Jumlah unit	Total FU Modern	Q Hunter (m ³ /s)	Q Hunter (L/s)	Rumus yang Digunakan
Zona 1	1-8	64	752	0.00580	5.80	$Q = 0.0283 \times \sqrt[0.45]{752}$
Zona 2	9-16	64	752	0.00580	5.80	$Q = 0.0283 \times \sqrt[0.45]{752}$
Zona 3	17-25	72	846	0.00616	6.16	$Q = 0.0283 \times \sqrt[0.45]{846}$
Main Riser 1-8	1-8	64	752	0.00580	5.80	$Q = 0.0283 \times \sqrt[0.45]{752}$
Main Riser 1-16	1-16	128	1,504	0.00907	9.07	$Q = 0.0283 \times (1504)^{0.45}$
Main Riser 1-25	1-25	200	2,350	0.01224	12.24	$Q = 0.0283 \times (2350)^{0.45}$

Tabel 5 Perhitungan Debit Hunter Komersial (*Office Tower*)

Zona Vertikal	Lantai	Total FU Modern	Q Hunter (m ³ /s)	Q Hunter (L/s)	Rumus yang Digunakan
Zona 1	1-6	195	0.00395	3.95	$Q = 0.0283 \times \sqrt[0.45]{195}$
Zona 2	7-12	195	0.00395	3.95	$Q = 0.0283 \times \sqrt[0.45]{195}$
Zona 3	13-18	195	0.00395	3.95	$Q = 0.0283 \times \sqrt[0.45]{195}$

Main Riser 1-6	1-6	195	0.00395	3.95	$Q = 0.0283 \times \sqrt{195}$
Main Riser 1-12	1-12	390	0.00558	5.58	$Q = 0.0283 \times \sqrt{390}$
Main Riser 1-18	1-18	585	0.00684	6.84	$Q = 0.0283 \times \sqrt{585}$

3.3 Perhitungan Dimensi Pipa Metode Hunter

Tabel 6 Dimensi Pipa Metode Hunter - Residensial

Lokasi	Q Hunter (L/s)	Q (m ³ /s)	V design (m/s)	D calc (mm)	D standard (mm)	A actual (m ²)	V actual (m/s)
Main Riser Lt 1-25	12.24	0.01224	2.0	88.3	100	0.00785	1.56
Main Riser Lt 1-16	9.07	0.00907	2.0	76.0	80	0.00503	1.80
Main Riser Lt 1-8	5.80	0.00580	2.0	60.7	65	0.00332	1.75
Branch per Floor	1.47	0.00147	2.0	30.6	32	0.00080	1.84
Sub-branch (4 unit)	0.73	0.00073	2.0	21.6	25	0.00049	1.49

Perhitungan Detail Main Riser 1-25:

$$Q = 0.01224 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V = 2.0 \text{ m/s}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 0.01224}{\pi \times 2}} = \sqrt{\frac{0.04896}{6.283}} = \sqrt{0.00779} = 0.0883 \text{ m} = 88.3 \text{ mm}$$

Kecepatan aktual :

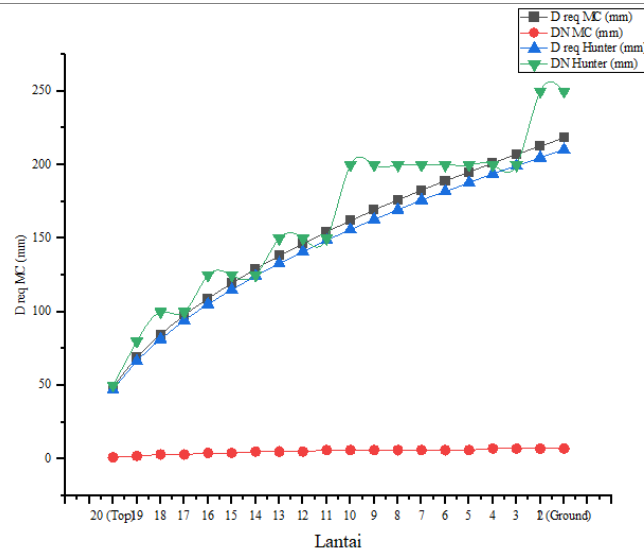
$$A = \frac{\pi \times (0.1)^2}{4} = 0.00785 \text{ m}^2$$

$$V_{actual} = \frac{Q}{A} = \frac{0.01224}{0.00785} = 1.56 \text{ m/s}$$

Tabel 7 Per Lantai Lexington Tower (20 lantai)

Floor	Contrib MC (L/s)	Cumulative MC (L/s)	D req MC (mm)	DN MC (mm)	Contrib Hunter (L/s)	Cumulative Hunter (L/s)	D req Hunter (mm)	DN Hunter (mm)
20 (Top)	1.872	1.872	48.8	50	1.735	1.735	47.0	50
19	1.872	3.744	69.1	80	1.735	3.469	66.4	80
18	1.872	5.616	84.6	100	1.735	5.204	81.4	100
17	1.872	7.488	97.7	100	1.735	6.939	94.0	100
16	1.872	9.360	109.1	125	1.735	8.674	105.2	125
15	1.872	11.232	119.4	125	1.735	10.408	115.0	125
14	1.872	13.104	129.2	150	1.735	12.143	124.4	125
13	1.872	14.976	138.1	150	1.735	13.878	132.9	150
12	1.872	16.848	146.3	150	1.735	15.612	141.0	150
11	1.872	18.720	154.4	200	1.735	17.347	148.7	150
10	1.872	20.592	161.9	200	1.735	19.082	155.9	200
9	1.872	22.464	169.2	200	1.735	20.817	162.9	200
8	1.872	24.336	176.1	200	1.735	22.551	169.4	200
7	1.872	26.208	182.7	200	1.735	24.286	176.0	200

6	1.872	28.080	189.1	200	1.735	26.021	181.9	200
5	1.872	29.952	195.0	200	1.735	27.756	187.9	200
4	1.872	31.824	201.2	250	1.735	29.491	193.9	200
3	1.872	33.696	207.1	250	1.735	31.225	199.3	200
2	1.872	35.568	212.7	250	1.735	32.960	204.9	250
1	1.872	37.440	218.4	250	1.735	34.695	210.3	250
(Ground)								



Gambar 2 grafik perbandingan

3.3 Perhitungan numerik (langkah per langkah)

a. Data input (angka)

$$Q_{MC,P95} = 37.440 \text{ L/s} \quad Q_{MC,P95} = 0.03744 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{Hunter} = 34.695 \text{ L/s} \quad Q_{Hunter} = 0.034695 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$v = 1.0 \text{ m/s}, L = 3.0 \text{ m}, C = 130, \quad \eta = 0.7, \quad \text{reseve head} = 10 \text{ m}.$$

b. Diameter kontinu (mm)

Untuk MC (P95)

$$A = \frac{0.03744}{1.0} = 0.03744 \text{ m}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 0.03744}{\pi}} = 0.2184 \text{ m} \quad D_{mm} \approx 218.4 \text{ mm}$$

DN nominal terdekat praktis: 250 mm, DN nominal yang dipilih harus sesuai ketersediaan standar (200, 250, 300 mm, dsb.). Karena $D_{req} > 200 \text{ mm}$, saya pilih 250 mm sebagai DN praktis.

4. Headloss per segmen (H-W), per segmen $L = 3 \text{ m}$

Untuk MC P95, DN = 0.25 m:

$$Q^{1.852} \approx (0.03744)^{1.852} \approx 2.29 \times 10^{-3}$$

$$D^{4.8704} \approx (0.25)^{4.8704} \approx 1.16 \times 10^{-3}$$

$$C^{1.852} \approx 130^{1.852} \approx 8,209$$

$$h_{f,seg-MC} \approx \frac{10.67 \cdot 3 \cdot 2.29 \times 10^{-3}}{8,209 \cdot 1.16 \times 10^{-3}} \approx 0.00769 \text{ m per segmen}$$

Cumulative (20 segmen) ≈ 0.1538 m

Untuk Hunter, DN = 0.25 m (pilihan sama):

$h_{f,seg-MC} \approx 0.00668$ m per segmen,

Cumulative (20 segmen) ≈ 0.1336 m

5. Head untuk pompa (reserve + cumulative)

$$H_{MC} = 10 + 0.1538 = 10.1538 \text{ m}$$

$$H_{Hunter} = 10 + 0.1336 = 10.1336$$

6. Power Pompa

Untuk MC

$$P_{MC} = \frac{1000 \cdot 9.81 \cdot 0.03744 \cdot 10.1538}{0.7} \approx 5.33 \text{ kW}$$

Untuk Hunter

$$P_{Hunter} = \frac{1000 \cdot 9.81 \cdot 0.034695 \cdot 10.1336}{0.7} \approx 4.94 \text{ kW}$$

7. Energi tahunan dan biaya (4 jam/hari puncak)

- Jam per tahun = 1,460 jam
- Energi MC: $E_{MC} = 5.33 \text{ kW} \times 1,460 \approx 7,774 \text{ kWh/tahun}$
- Biaya $7,774 \times \text{Rp. } 1,500 \approx \text{Rp. } 11,662,000 / \text{tahun}$
- Energi Hunter : $E_{Hunter} = 4.94 \text{ kW} \times 1,460 \approx 7,208 \text{ kWh / tahun}$
- Biaya: $7,208 \times 1,500 \approx \text{Rp. } 10,812,000 / \text{tahun}$

Tabel 8 Perbandingan Ringkas (Hunter vs Model Alternatif MC P95)

Indikator	Unit	Hunter	Model Alternatif (MC P95)	Selisih (Alt – Hunter)	Relatif (%)
Peak flow (Q)	L/s	34.695	37.440	+2.745 L/s	+7.91%
Peak flow	m ³ /h	124.902	134.784	+9.882 m ³ /h	+7.91%
Required D kontinu	mm	210.3	218.4	+8.1 mm	+3.85%
DN nominal (practical)	mm	250	250	0	0%
Headloss per seg (H– W)	m/seg	0.00668	0.00769	+0.00101 m	+15.1%
Cumulative headloss (20 seg)	m	0.1336	0.1538	+0.0202 m	+15.1%
Pump head (reserve+cum)	m	10.1336	10.1538	+0.0202 m	+0.20%
Pump power (P)	kW	4.94	5.33	+0.39 kW	+7.91%
Energy (1.460 h/yr)	kWh/yr	7,208	7,774	+566 kWh/yr	+7.86%
Energy cost (Rp/yr)	Rp	10,812,000	11,662,000	+850,000 Rp/yr	+7.87%

4. KESIMPULAN

1. Teori Hunter Curves terbukti memiliki keterbatasan dalam perencanaan sistem plumbing gedung bertingkat di Indonesia. Hasil analisis pada Gedung Podomoro Lexington Tower menunjukkan bahwa metode Hunter memberikan estimasi debit puncak yang cenderung lebih rendah dibandingkan pendekatan probabilistik Monte Carlo (P95), dengan selisih $\pm 7,91\%$.
2. Perbedaan debit puncak berdampak pada sizing pipa dan kebutuhan pompa. Perhitungan Hunter menghasilkan diameter kontinu 210,3 mm, sementara model alternatif mencapai 218,4 mm.

- Meskipun keduanya pada akhirnya menggunakan DN nominal yang sama (DN 250), model alternatif lebih konservatif dalam mengantisipasi beban puncak.
3. Analisis headloss dan pompa menunjukkan bahwa model alternatif menimbulkan headloss dan kebutuhan daya pompa yang sedikit lebih tinggi dibanding Hunter (selisih daya $\pm 0,39$ kW atau $+7,91\%$). Namun, hal ini memberikan jaminan keandalan sistem untuk menghadapi variasi konsumsi air yang lebih realistis.
 4. Dampak ekonomi dan operasional: penggunaan model alternatif menghasilkan tambahan biaya listrik sekitar Rp 850.000 per tahun, namun kelebihan ini dianggap sepadan dengan peningkatan akurasi, efisiensi, dan keberlanjutan sistem plumbing yang lebih baik.
 5. Kontribusi penelitian ini adalah mengusulkan model alternatif berbasis simulasi probabilitas dan optimasi hidrolik yang lebih relevan dengan kondisi lokal Indonesia, terutama pada gedung modern yang sudah menerapkan perangkat hemat air. Model ini dapat mengurangi risiko pemborosan, meningkatkan efisiensi energi, serta mendukung kebijakan pembangunan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Program Studi Teknik mesin dan LPPM Universitas Al Azhar Medan yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan penelitian, kemudian Terimakasih kepada Mahasiswa Teknik Mesin Al Azhar yang telah membantu penelitian tersebut dan rekan rekan Dosen di UMSU

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Li, H. Li, Y. Liu, S. Wang, X. Pei, and Q. Li, "Fire risk assessment of high-rise buildings under construction based on unascertained measure theory," *PLoS One*, vol. 15, no. 9 september, pp. 1–17, 2020, doi: 10.1371/journal.pone.0239166.
- [2] C. K. Murti and F. Muslim, "Relationship between Functions, Drivers, Barriers, and Strategies of Building Information Modelling (BIM) and Sustainable Construction Criteria: Indonesia Construction Industry," *Sustain.*, vol. 15, no. 6, pp. 1–27, 2023, doi: 10.3390/su15065526.
- [3] R. Taftazani, S. Kazama, and S. Takizawa, "Spatial Analysis of Groundwater Abstraction and Land Subsidence for Planning the Piped Water Supply in Jakarta, Indonesia," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 20, pp. 1–20, 2022, doi: 10.3390/w14203197.
- [4] C. Bai, L. Yao, C. Wang, Y. Zhao, and W. Peng, "Optimization of Water and Energy Spatial Patterns in the Cascade Pump Station Irrigation District," *Sustain.*, vol. 14, no. 9, 2022, doi: 10.3390/su14094943.
- [5] 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, 2023, doi: 10.3390/su15021576.
- [6] S. Agarwal, E. Araral, M. Fan, Y. Qin, and H. Zheng, "Plumbing vs Nudging: The Lasting Effect of Efficiency Improvements on Water Conservation," *SSRN Electron. J.*, vol. 19 Mar 202, pp. 1–49, 2021, doi: 10.2139/ssrn.3815431.
- [7] 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.
- [8] A. I. Wibowo and K. C. Chang, "Solar energy-based water treatment system applicable to the remote areas: Case of indonesia arsanto ishadi wibowo and keh-chin chang," *J. Water*

- Sanit. Hyg. Dev.*, vol. 10, no. 2, pp. 347–356, 2020, doi: 10.2166/washdev.2020.003.
- [9] R. A. Flores and E. Ghisi, “Water Benchmarking in Buildings: A Systematic Review on Methods and Benchmarks for Water Conservation,” *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 3, pp. 1–20, 2022, doi: 10.3390/w14030473.
- [10] V. Vadez *et al.*, “Water use efficiency across scales: from genes to landscapes,” *J. Exp. Bot.*, vol. 74, no. 16, pp. 4770–4788, 2023, doi: 10.1093/jxb/erad052.
- [11] R. M. Kaustav, D. Subhasish, and M. Asis, “Standardization of Fixture Units for Modern Flush Valves by Optimizing Water Demand Using Modified Hunter’s Curve,” *J. Pipeline Syst. Eng. Pract.*, vol. 12, no. 3, p. 4021022, Aug. 2021, doi: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000558.
- [12] L. jie Jiang, B. Zhang, S. hua Huang, and Y. Shao, “Analysis of fluidized zone in transparent soil under jet induced by pipe leakage,” *Water Sci. Eng.*, vol. 16, no. 2, pp. 203–210, 2023, doi: 10.1016/j.wse.2023.01.002.
- [13] H. Y. S. H. Nugroho *et al.*, “Forty Years of Soil and Water Conservation Policy, Implementation, Research and Development in Indonesia: A Review,” *Sustain.*, vol. 14, no. 5, pp. 1–33, 2022, doi: 10.3390/su14052972.
- [14] P. Rejekiingrum *et al.*, “Optimising Water Management in Drylands to Increase Crop Productivity and Anticipate Climate Change in Indonesia,” *Sustain.*, vol. 14, no. 18, pp. 1–24, 2022, doi: 10.3390/su141811672.
- [15] 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.
- [16] A. Ali *et al.*, “Development of a Smart City Platform Based on Digital Twin Technology for Monitoring and Supporting Decision-Making,” *sustainability*, vol. 15, no. 18, pp. 1–18, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/su151814002>.
- [17] J. S. Gracias, G. S. Parnell, E. Specking, E. A. Pohl, and R. Buchanan, “smart cities Smart Cities — A Structured Literature Review,” *smart cities Rev.*, vol. 6, no. 4, pp. 1719–1743, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/smartcities6040080>.
- [18] Q. Lu, X. Xie, A. K. Parlikad, J. M. Schooling, and E. Konstantinou, “Moving from building information models to digital twins for operation and maintenance,” *Proc. Inst. Civ. Eng. - Smart Infrastruct. Constr.*, vol. 174, no. 2, pp. 46–56, Feb. 2020, doi: 10.1680/jsmic.19.00011.
- [19] M. Hasib *et al.*, “Revealing the shallow magmatic plumbing system of Sinabung Volcano during 2014–2017 eruption events using seismic tomography,” *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 452, p. 108137, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2024.108137>.
- [20] 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.
- [21] M. À. Cugueró-Escofet and V. Puig, “Advances in the Monitoring, Diagnosis and Optimisation of Water Systems,” *Sensors*, vol. 23, no. 6, pp. 10–12, 2023, doi: 10.3390/s23063256.
- [22] X. Zhao *et al.*, “Review of module division methods for mechanical, electrical, and plumbing systems in construction,” *J. Build. Eng.*, vol. 101, p. 111753, 2025, doi:

- <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111753>.
- [23] S. Jing, X. Li, M. B. Maru, B. Yu, G. Cha, and S. Park, "Occlusion-aware hybrid learning framework for point cloud understanding in building mechanical, electrical, and plumbing systems," *Energy Build.*, vol. 344, p. 115955, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115955>.
- [24] A. Mukhtar *et al.*, "An integrated renewable energy and machine learning framework for techno economic analysis of water and energy nexus management in arid climates," *Sci. Rep.*, vol. 30 Septemb, no. 4, pp. 1–21, 2025, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11981-0>.
- [25] C. Hongling *et al.*, "Mixed methods research in general practice: Key points of design and implementation and case analysis," *Chinese Gen. Pract. J.*, vol. 2, no. 3, pp. 1–7, 2025, doi: [10.1016/j.cgj.2025.100070](https://doi.org/10.1016/j.cgj.2025.100070).
- [26] M. G. Stutesman, T. R. Goldstein, and D. Varier, "Methodology for research on psychology of the Arts: A systematic review, critique, and argument for mixed methods," *Methods Psychol.*, vol. 13, no. April, pp. 18–30, 2025, doi: [10.1016/j.metip.2025.100199](https://doi.org/10.1016/j.metip.2025.100199).
- [27] E. Ruiz, S. Díaz, and J. González, "Potential Performance of Hydraulic State Estimation in Water Distribution Networks," *Water Resour. Manag.*, vol. 36, no. 2, pp. 745–762, 2022, doi: [10.1007/s11269-021-03056-2](https://doi.org/10.1007/s11269-021-03056-2).
- [28] S. Duffuaa, M. Idris, A. Kolus, and U. Al-Turki, "A mathematical model for optimal turnaround maintenance planning and scheduling for a network of plants in process industry supply chain," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 180, p. 108477, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108477>.
- [29] C. Voyer *et al.*, "Monte Carlo simulation benefits to healthcare product manufacturers in radiation processing," *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 238, no. July 2025, p. 113033, 2026, doi: [10.1016/j.radphyschem.2025.113033](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2025.113033).