

RESEARCH ARTICLE

Optimization of Water Distribution Based on Head loss Analysis Using EPANET Software

(Optimalisasi Distribusi Air Berbasis Analisis *Head loss* Menggunakan Software EPANET)

Desy Fitria Wulandari, Agus Subekti^{*}, Agung Tjahjo Nugroho

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember,
Jl. Kalimantan No. 37 Kampus Tegalboto, Jember, Jawa Timur, 68121, Indonesia

ABSTRACT

Water is a vital resource that supports various sectors of life, particularly agriculture. In irrigation systems, efficient water distribution is often hindered by pressure loss (head loss) caused by friction between the water flow and pipe walls. This study aims to analyze head loss in irrigation networks using the Darcy-Weisbach equation and compare the results with simulations conducted using EPANET software. The analysis involved manual calculations based on field discharge data and network simulations replicated in EPANET. The results showed an accuracy level of 80.69% with a relative error of 19.31%. Network modification was performed by increasing the pipe diameter in the primary channel (P1-P4), resulting in a uniform discharge of 0.04 L/s in secondary channels and 0.02 L/s in tertiary channels. This modification reduced the average head loss by 69.72%, indicating a significant improvement in water distribution efficiency.

Air merupakan sumber daya vital yang mendukung berbagai sektor kehidupan, khususnya pertanian. Dalam sistem irigasi, efisiensi distribusi air sering terkendala oleh kehilangan tekanan (*head loss*) akibat gesekan antara aliran air dan dinding pipa. Penelitian ini bertujuan menganalisis *head loss* pada jaringan irigasi menggunakan persamaan Darcy-Weisbach serta membandingkannya dengan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak EPANET. Analisis dilakukan melalui perhitungan manual berdasarkan data debit lapangan dan simulasi jaringan yang direplikasi dalam EPANET. Hasil menunjukkan tingkat akurasi sebesar 80,69% dengan galat relatif 19,31%. Modifikasi jaringan dilakukan dengan memperbesar diameter pipa saluran primer (P1-P4), yang menghasilkan debit seragam pada saluran sekunder sebesar 0,04 L/s dan pada saluran tersier sebesar 0,02 L/s. Modifikasi ini menurunkan rata-rata head loss hingga 69,72%, menunjukkan peningkatan efisiensi distribusi air secara signifikan.

Keywords: Darcy-Weisbach Equation, EPANET, Head loss, Irrigation, Water Distribution.

^{*}Corresponding author:
Agus Subekti
E-mail: subekti@unej.ac.id

PENDAHULUAN

Air merupakan salah satu sumber daya utama yang menopang berbagai aspek kehidupan yang menutupi sekitar 71% permukaan bumi [1], dan memiliki peran penting dalam sektor pertanian, terutama bagi masyarakat Indonesia yang mayoritas bermata pencaharian sebagai petani. Dalam praktiknya, air dimanfaatkan melalui sistem irigasi untuk menunjang pertumbuhan tanaman. Tujuan utama irigasi adalah mendistribusikan air secara merata dan efisien ke seluruh lahan pertanian. Namun, kinerja sistem irigasi sering mengalami hambatan, salah satunya adalah penurunan tekanan (*pressure drop*) akibat gesekan antara air dan permukaan pipa. Gesekan ini menyebabkan hilangnya energi aliran yang dikenal

sebagai *head loss* [2]. *Head loss* terdiri dari dua jenis, yaitu *head loss* mayor dan *head loss* minor. *Head loss* mayor terjadi akibat gesekan fluida sepanjang pipa lurus [3], sedangkan *head loss* minor disebabkan oleh gesekan fluida dengan komponen tambahan pipa seperti elbow, tees, union, dan valve [4] [5].

Perhitungan *head loss* dapat dilakukan menggunakan berbagai persamaan, seperti persamaan Darcy-Weisbach, Hazen-Williams, Chezy, Manning, dan Scobey. Di antara semuanya, persamaan Darcy-Weisbach merupakan salah satu yang paling umum digunakan karena tingkat akurasi yang tinggi. Persamaan ini, yang dikembangkan oleh Henry Darcy dan Julius Weisbach pada abad ke-19, sangat relevan dalam perancangan sistem perpipaan, termasuk sistem irigasi, khususnya untuk menghitung *head loss* mayor.

Besar kecilnya *head loss* dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti diameter pipa, debit aliran, viskositas fluida, dan keberadaan sambungan atau fitting dalam jaringan [6]. Dalam aplikasinya, persamaan Darcy-Weisbach dapat digunakan untuk menganalisis dan mengidentifikasi bagian jaringan irigasi yang mengalami kerugian energi tinggi, sehingga memudahkan proses perencanaan perbaikan atau pemeliharaan.

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan pentingnya penggunaan persamaan Darcy-Weisbach dalam menghitung *head loss* pada jaringan perpipaan, baik melalui eksperimen langsung maupun simulasi menggunakan perangkat lunak seperti EPANET. Sinaga dkk. [7] menegaskan bahwa persamaan ini dapat diterapkan pada berbagai kondisi aliran fluida, menjadikannya pilihan yang tepat dalam menghitung *head loss*. Rafiq [8] juga menunjukkan keunggulan persamaan ini dalam menghitung *head loss*, khususnya pada pipa PVC yang memiliki karakteristik kekasaran permukaan tertentu. Untuk menentukan nilai friction factor (*f*) dalam persamaan Darcy-Weisbach, pendekatan menggunakan diagram Moody dan persamaan Colebrook-White kerap digunakan. Luthfi dan Yulianto [9] menyoroti tantangan penggunaan diagram Moody yang memerlukan interpolasi grafik, yang dapat menimbulkan ketidakpastian dalam hasil. Di sisi lain, pendekatan dengan persamaan Colebrook-White seperti yang diusulkan Kowalczyk dan Tatara [10] memberikan alternatif solusi yang lebih akurat.

Aplikasi persamaan Darcy-Weisbach dapat ditunjang oleh perangkat lunak simulasi hidraulik seperti EPANET, yang dikembangkan oleh *US Environmental Protection Agency* (EPA) untuk melakukan simulasi hidrolika dan kualitas air dalam jaringan pipa bertekanan [11]. EPANET telah terbukti mampu memodelkan aliran dan kecepatan air secara baik, sebagaimana dilaporkan oleh Mehta dkk. [12], meskipun aspek validasi terhadap hasil *head loss* masih belum dibahas secara mendalam dalam literatur tersebut.

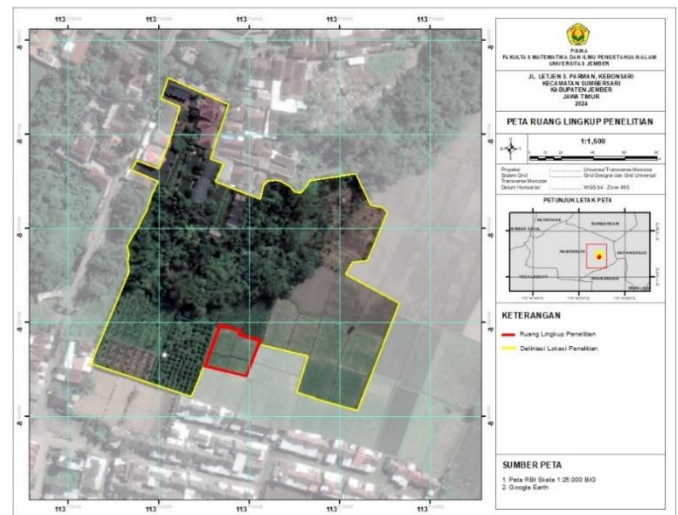
Penelitian ini memiliki nilai tambah (*novelty*) dengan memadukan pendekatan perhitungan manual menggunakan persamaan Darcy-Weisbach dan simulasi EPANET yang difokuskan pada sistem irigasi pertanian. Keunikan pendekatan ini terletak pada proses validasi hasil simulasi EPANET terhadap data eksperimen lapangan, serta analisis pemodelan

kebutuhan debit (*demand*) berdasarkan kondisi aktual distribusi air di lahan irigasi. Dengan membandingkan hasil simulasi dan perhitungan aktual, diperoleh tingkat akurasi model yang kemudian dijadikan dasar dalam perencanaan modifikasi jaringan. Modifikasi ini ditujukan untuk menurunkan *head loss* secara signifikan dan meningkatkan efisiensi distribusi air, sehingga mendukung tercapainya suplai air yang optimal untuk seluruh area tanaman.

METODE PENELITIAN

Lokasi dan Jenis Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada jaringan irigasi yang sudah tersedia di lahan perkebunan seluas $\pm 596 \text{ m}^2$ yang terletak di Kabupaten Jember. Secara geografis, lahan tersebut berada pada koordinat $8^{\circ}11'17.52'' \text{ LS}$, $113^{\circ}42'51.76'' \text{ BT}$ hingga $8^{\circ}11'18.50'' \text{ LS}$, $113^{\circ}42'52.32'' \text{ BT}$. Peta lokasi lahan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Jenis penelitian ini termasuk kedalam jenis penelitian kuantitatif dengan pendekatan eksperimen. Penelitian ini melakukan perhitungan *head loss* pada jaringan irigasi dengan dua metode, yaitu manual dengan mengambil data dari jaringan irigasi di lapangan dan simulasi menggunakan *software* EPANET 2.2. eksperimen yang dilakukan adalah modifikasi pergantian diameter pipa yang akan mempengaruhi *head loss* dan pemerataan distribusi air.

Data Penelitian

Populasi penelitian adalah seluruh jaringan irigasi pada lokasi penelitian mencakup seluruh saluran yang

ada dengan dua jenis pipa yaitu PVC dan HDPE. Sedangkan sampel atau subjek yang digunakan pada penelitian ini berfokus pada saluran yang melintasi tanaman dengan jenis pipa HDPE. Beberapa data yang diperlukan untuk mengetahui nilai *head loss* dari subjek tersebut terbagi menjadi dua, yaitu data primer dan sekunder. Data-data tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data penelitian

No.	Jenis Data	Parameter
1.	Data primer	Panjang Pipa (m)
2.		Diameter Pipa (m)
3.		Debit Air (L/s)
1.	Data sekunder	Koefisien Gesek Pipa (ϵ)
2.		Viskositas Air (μ)
3.		Massa Jenis (ρ)
4.		Elevasi (m)

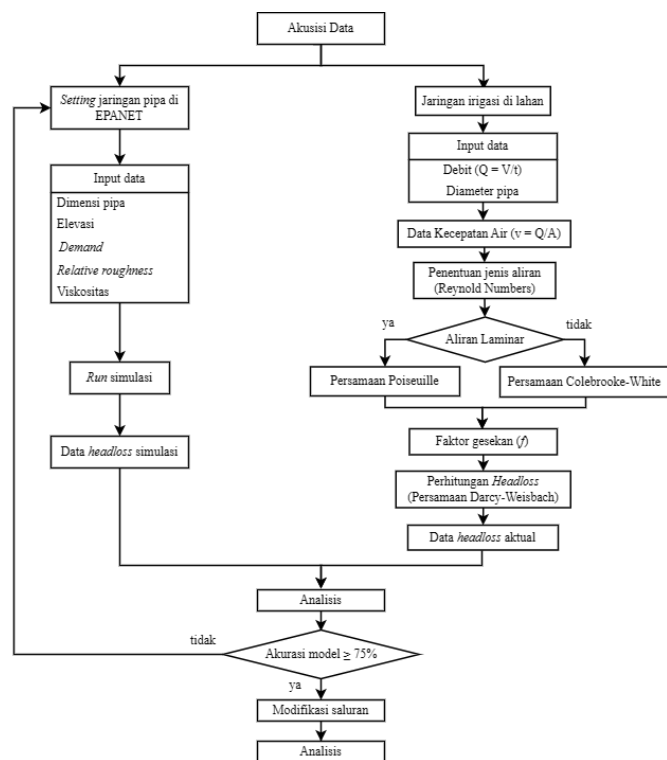
Data primer diperoleh melalui pengukuran langsung atau data sesuai lapangan, sedangkan untuk data sekunder diperoleh melalui referensi atau didapat dari *software* penunjang. Berikut merupakan beberapa peralatan yang digunakan untuk mendapatkan data primer dan sekunder (Tabel 2).

Tabel 2. Alat dan Bahan

Alat dan Bahan	Fungsi
Gelas Ukur	Sebagai wadah untuk mengukur debit air dari segmen-segmen pipa dengan metode volumetrik
Stopwatch	Sebagai pengukur waktu saat pengambilan data debit
Meteran	Untuk mengukur panjang pipa tiap segmen
Software Google Earth	Untuk mengetahui nilai elevasi jaringan pipa
Software EPANET 2.2	Sebagai perangkat untuk mereplikasi dan mensimulasikan jaringan pipa
Software Microsoft Excel	Sebagai alat untuk menghitung <i>head loss</i> secara manual dengan persamaan Darcy-Weisbach

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini mencakup seluruh tahapan yang dilakukan, mulai dari pengumpulan data lapangan hingga analisis hasil akhir. Untuk menggambarkan alur kegiatan penelitian secara lebih jelas, skema prosedur penelitian disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Prosedur Penelitian

Gambar 2 menyajikan alur prosedur penelitian yang menggambarkan seluruh tahapan yang dilakukan, mulai dari pengambilan data di lapangan hingga analisis hasil akhir. Secara umum, prosedur ini terbagi menjadi dua jalur utama, yaitu perhitungan manual menggunakan persamaan Darcy-Weisbach dan simulasi menggunakan perangkat lunak EPANET.

Pada jalur perhitungan manual, proses diawali dengan pengambilan data debit di lapangan. Data ini kemudian digunakan untuk menentukan jenis aliran berdasarkan bilangan Reynolds (*Reynolds Number*). Berdasarkan jenis aliran tersebut, dipilih pendekatan perhitungan yang sesuai menggunakan persamaan Poiseuille untuk aliran laminar, atau persamaan Colebrook-White untuk aliran turbulen untuk memperoleh nilai friction factor (f). Nilai ini menjadi input dalam persamaan Darcy-Weisbach guna menghitung *head loss*.

Sementara itu, pada jalur simulasi EPANET, jaringan pipa yang ada direplikasi dalam model digital. Data input seperti debit, panjang, diameter, dan jenis pipa dimasukkan untuk menghasilkan perhitungan *head loss* secara otomatis berdasarkan prinsip hidraulika yang sesuai dengan pendekatan Darcy-Weisbach.

Setelah kedua metode menghasilkan nilai *head loss*, dilakukan perbandingan untuk mengevaluasi akurasi hasil simulasi terhadap perhitungan manual. Jika tingkat akurasi telah memenuhi kriteria yang ditetapkan, maka dilakukan modifikasi pada jaringan, khususnya pada bagian-bagian dengan *head loss* tinggi. Tujuan dari modifikasi ini adalah untuk mengevaluasi dampaknya terhadap pemerataan debit air serta peningkatan efisiensi distribusi pada sistem irigasi.

Formulasi Perhitungan

Head loss yang diperhitungkan pada penelitian ini terdiri dari *head loss* mayor, yang minor. *Head loss* minor dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut :

$$hm = KL \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan :

- hm = *minor head loss* (m)
- KL = koefisien kehilangan (*lost coefficient*)
- v = kecepatan fluida dalam pipa (m/s)
- g = percepatan gravitasi (m/s²)

Nilai koefisien kehilangan (KL) bergantung pada jenis pipa yang digunakan, misalnya elbows 45°-90° berkisar 0.5-1.5, tees branch flow dan line flow berkisar 0.2-1, dan union bernilai 0.08 [5]. Persamaan utama yang digunakan untuk menghitung *head loss* mayor adalah persamaan Darcy-Weisbach. Persamaan ini secara sistematis dinyatakan sebagai :

$$hl = \frac{flv^2}{2gD} \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan :

- hl = *head loss* dalam satuan panjang (m)
- f = faktor gesekan Darcy-Weisbach
- l = panjang pipa dalam satuan panjang (m)
- D = diameter pipa dalam satuan panjang (m)
- v = kecepatan aliran fluida dalam pipa (m/s)
- g = percepatan gravitasi (m/s²)

Nilai faktor gesekan atau *friction factor* (f) pada persamaan tersebut menunjukkan besar nilai gesekan antara fluida dan dinding pipa sesuai jenis yang digunakan dan dipengaruhi oleh jenis aliran dan kondisi permukaan pipa. Penentuan jenis aliran ini dapat diketahui menggunakan persamaan Reynold Number (Re) yang merupakan rasio antara gaya inersia fluida terhadap gaya viskositas dalam aliran fluida [13] yang dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan :

- ρ = massa jenis fluida (kg/m³)
- v = kecepatan aliran fluida (m/s)
- D = diameter pipa (m)
- μ = viskositas dinamis fluida (N.s/m²)

Nilai Re menentukan jenis aliran yang terjadi di dalam saluran pipa. Menurut Donda, dkk. [14] jenis aliran terbagi menjadi tiga dengan kriteria sebagai berikut :

Aliran laminar (Re<2300) : aliran bersifat stabil dan teratur. *Friction factor* (f) untuk aliran ini dirumuskan dengan persamaan :

$$f = \frac{64}{Re} \dots\dots\dots (4)$$

Aliran Transisi (2300 < Re < 4000): karakteristik aliran bervariasi (kondisi peralihan).

Aliran Turbulen (Re > 4000: aliran cenderung tidak teratur dan berstruktur turbulen. *Friction factor* (f) untuk jenis aliran transisi dan turbulen dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \dots\dots\dots (5)$$

Keterangan :

- ϵ = kekasaran relatif permukaan pipa
- D = diameter pipa (m)
- Re = Reynold Number

Nilai kekasaran relatif permukaan pipa (ϵ) dipengaruhi oleh kondisi material pipa. Jenis pipa yang digunakan pada penelitian ini adalah HDPE, sehingga nilai ϵ untuk pipa ini bernilai 0,07 mm atau 0,00007 m [15]. Nilai f yang telah didapat dengan persamaan tersebut kemudian dapat digunakan sebagai masukan penyelesaian persamaan Darcy-Weisbach. Analisis data yang digunakan untuk menguji seberapa dekat nilai *head loss* yang dihasilkan oleh simulasi *software* EPANET dibandingkan dengan perhitungan manual, digunakan persamaan berikut :

$$Akurasi (\%) = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |hl_{aktual} - hl_{simulasi}|}{\sum_{i=1}^n hl_{aktual}} \right) \times 100\% \dots\dots (6)$$

Persamaan tersebut digunakan untuk mengetahui akurasi *software* dalam merepresentasikan nilai *head loss* sesuai dengan perhitungan manual dimana kedua metode (simulasi dan manual) menggunakan persamaan yang sama yaitu persamaan Darcy-Weisbach.

Akurasi minimal yang perlu dicapai dalam penelitian ini ditetapkan sebesar 75% sebelum dilakukan analisis dan modifikasi jaringan. Penetapan ini mengacu pada praktik umum dalam pemodelan hidraulik jaringan distribusi air, di mana tingkat akurasi di atas 70% umumnya masih dianggap dapat diterima untuk tujuan perencanaan dan optimasi. Sebagai perbandingan, penelitian oleh [16] menunjukkan bahwa 87,7% dari kecepatan aliran dalam jaringan distribusi air yang disimulasikan dengan EPANET berada dalam rentang nilai yang diterima, meskipun terdapat perbedaan kecil dibandingkan dengan WaterCAD. Hal ini memperkuat bahwa akurasi model EPANET di atas 75% dapat digunakan sebagai dasar validasi sebelum dilakukan intervensi jaringan. Apabila akurasi telah tercapai, maka replikasi pada simulasi dianggap sudah merepresentasikan kondisi aktual dan dapat dilakukan modifikasi lanjutan. Modifikasi yang dilakukan (pergantian diameter) pasti mempengaruhi *head loss* dan distribusi jaringan, sehingga digunakan persamaan berikut untuk melihat pengaruhnya :

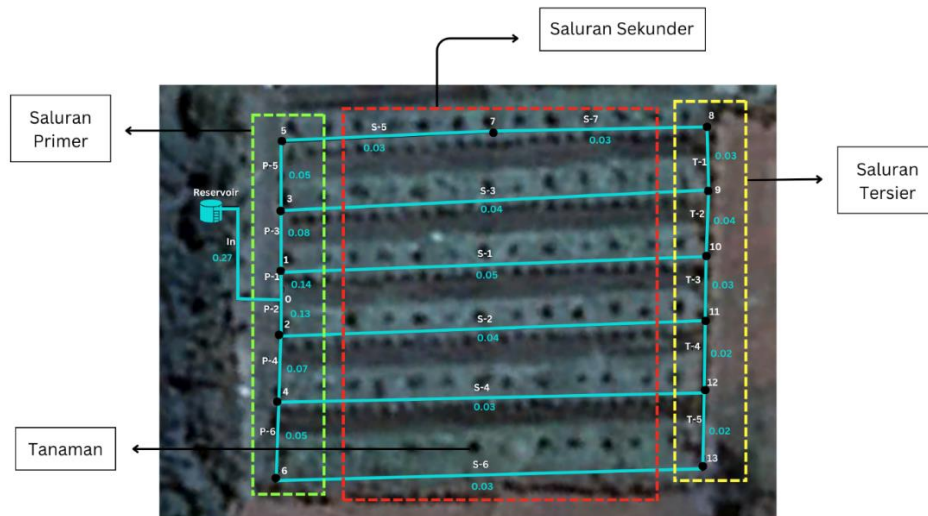
$$\% \text{penurunan } hl = \frac{\overline{hl} \text{ sebelum} - \overline{hl} \text{ sesudah}}{\overline{hl} \text{ sebelum}} \times 100\% \dots (7)$$

Persamaan tersebut menunjukkan presentase penurunan *head loss* yang terjadi setelah pipa dimodifikasi dan analisis pemerataan distribusi dapat terlihat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Replikasi Jaringan

Replikasi jaringan bertujuan untuk membangun model jaringan yang sama seperti jaringan yang sudah ada di lahan untuk mempermudah analisis dan modifikasi. Proses replikasi dilakukan dengan mengumpulkan data inputan *software* EPANET disesuaikan kondisi aslinya, seperti pada Tabel 1. Model jaringan terlebih dahulu dibangun pada *software* EPANET diawali dengan menambahkan titik atau node disetiap sambungan kemudian titik tersebut saling disambungkan oleh garis yang merepresentasikan pipa. Model replikasi dapat dilihat pada Gambar 3.



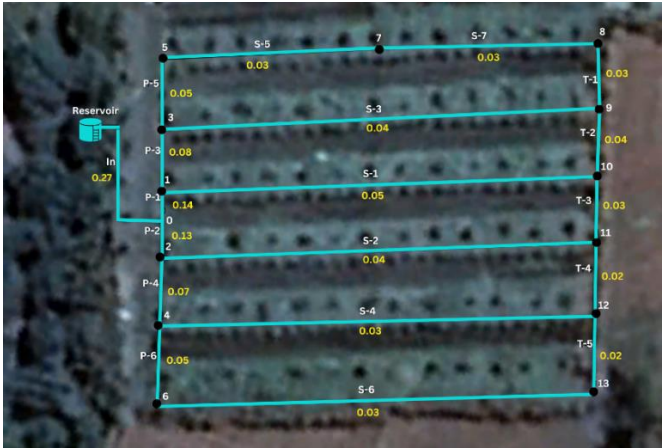
Gambar 3. Bagan bagian jaringan

Gambar 3 menggunakan *backdrop* latar lahan asli yang diperoleh dari *software* Google Earth. Pada replikasi terdapat tiga saluran yang ditandai dengan warna *outline* yang berbeda. *Outline* hijau untuk saluran primer, *outline* merah untuk saluran sekunder, dan, *outline* kuning untuk saluran tersier. Titik-titik hitam yang terlihat dilewati oleh saluran sekunder merupakan tanaman yang ada di lahan, sehingga

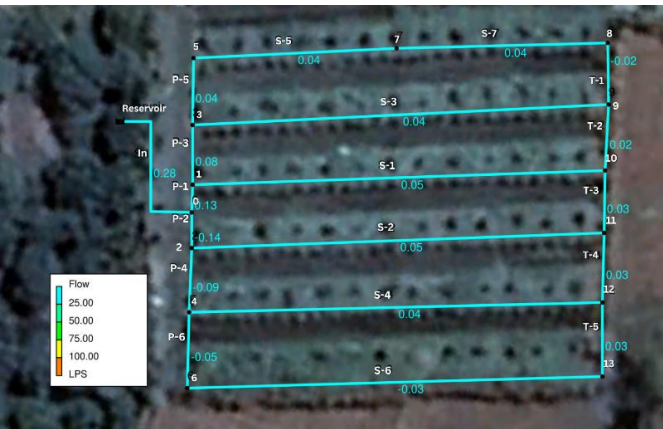
penelitian difokuskan untuk pemerataan distribusi air pada pipa sekunder demi pasokan air yang cukup.

Pada EPANET, debit aliran merupakan output dari input *demand* pada tiap node selain input pada Tabel 1. yang didefinisikan sebagai kebutuhan air tiap blok [17]. Data *demand* pada penelitian ini tidak mempunyai sumber spesifik, melainkan digunakan sebagai kontrol untuk menyesuaikan debit yang telah diambil secara langsung. Penyesuaian dilakukan melalui iterasi

dengan mengubah *demand* hingga debit yang dihasilkan sama atau mendekati hasil pengukuran. Pendekatan ini meningkatkan akurasi model dan membantu mengidentifikasi ketidaksesuaian input. Perbandingan hasil debit simulasi dan pengukuran ditunjukkan pada Gambar 4, Gambar 5, dan Tabel 3.



Gambar 4. Debit jaringan irigasi dengan kondisi sebenarnya



Gambar 5. Debit jaringan replikasi pada *software* EPANET

Gambar 4 menunjukkan debit jaringan irigasi berdasarkan pengukuran lapangan, sedangkan Gambar 5 merupakan debit simulasi melalui penyesuaian *demand*.

Berdasarkan Tabel 3, perbandingan debit menunjukkan adanya deviasi kecil karena penyesuaian yang dilakukan. Debit hasil pengukuran dan simulasi ini menjadi dasar perhitungan *head loss*.

Tabel 3. Perbandingan debit pengukuran dan hasil replikasi jaringan

No.	Segmen Pipa	Debit Pengukuran (L/s)	Debit Replikasi (L/s)
1	In	0.27	0.28
2	P-1	0.14	0.13
3	P-2	0.13	0.14
4	P-3	0.08	0.08
5	P-4	0.07	0.09
6	P-5	0.05	0.04
7	P-6	0.05	0.05
8	S-1	0.05	0.05
9	S-2	0.04	0.05
10	S-3	0.04	0.04
11	S-4	0.03	0.04
12	S-5	0.03	0.04
13	S-6	0.03	0.03
14	S-7	0.03	0.04
15	T-1	0.03	0.02
16	T-2	0.04	0.02
17	T-3	0.03	0.03
18	T-4	0.02	0.03
19	T-5	0.02	0.03

Debit hasil pengukuran dihitung dengan persamaan Darcy-Weisbach untuk *head loss mayor* dan persamaan (1) untuk *head loss minor*. pada *software* EPANET, *head loss* dihitung secara otomatis berdasarkan parameter hidraulik, yang tetap mengacu pada prinsip Darcy-Weisbach. Hasil perbandingan kedua metode ditampilkan pada Tabel 4.

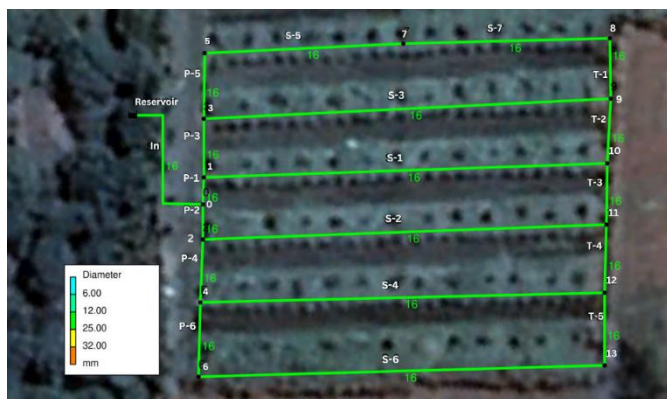
Berdasarkan analisis tersebut, akurasi model didapat mencapai angka 80,69% dengan relative error 19,31%, yang masih berada dalam batas toleransi ($\leq 25\%$) [16]. Hal ini menunjukkan bahwa model cukup representative terhadap kondisi hidraulik nyata dan layak digunakan untuk analisis lanjutan.

Tabel 4. Akurasi *head loss* simulasi terhadap *head loss* aktual

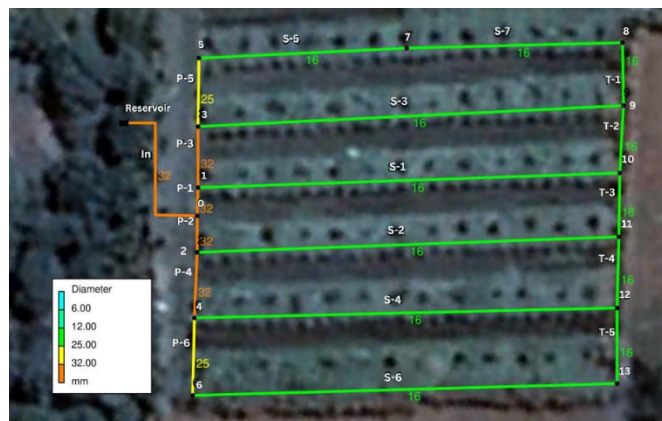
No.	Titik	Kategori Pipa	Panjang Pipa (m)	<i>Head loss</i> aktual (m)	<i>Head loss</i> EPANET (m)	Akurasi
1	In	Inlet	8.8	1.870	1.541	80.69%
2	P-1	Primer	2	0.162	0.127	
3	P-2		1.7	0.126	0.137	
4	P-3		4.1	0.099	0.092	
5	P-4		4.1	0.077	0.117	
6	P-5		4.1	0.040	0.020	
7	P-6		4.3	0.044	0.042	
8	S-1	Sekunder	25.9	0.232	0.208	
9	S-2		26	0.157	0.207	
10	S-3		25.9	0.156	0.117	
11	S-4		26	0.095	0.096	
12	S-5		13	0.046	0.051	
13	S-6		26	0.094	0.064	
14	S-7		13.6	0.050	0.052	
15	T-1	Tersier	4	0.017	0.007	
16	T-2		4.1	0.028	0.005	
17	T-3		3.8	0.016	0.008	
18	T-4		3.2	0.005	0.009	
19	T-5		5.7	0.008	0.012	

Modifikasi Jaringan

Analisis *head loss* dengan nilai tinggi ditunjukkan oleh saluran primer dan sekunder sesuai Tabel 4., namun pada pipa sekunder, nilai *head loss* tersebut dianggap wajar mengingat Panjang segmen pipa berkisar 13-26 m. Sebaliknya, pada pipa primer menunjukkan hambatan yang tidak proporsional karena pada segmen P-1 hingga P-6 hanya memiliki Panjang 1,7-4,3 m. Atas dasar analisis tersebut, modifikasi difokuskan pada perubahan diameter pipa primer untuk meningkatkan pemerataan air dan penurunan *head loss*. Perbedaan konfigurasi pipa sebelum dan sesudah modifikasi ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Diameter pipa sebelum modifikasi



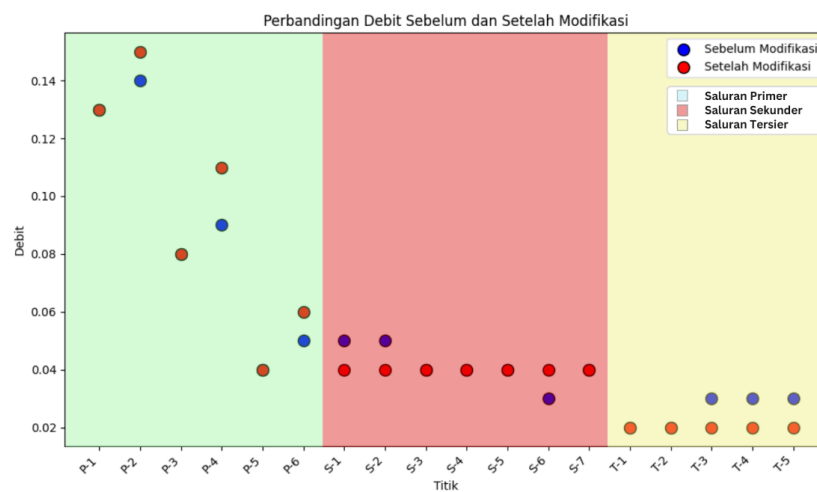
Gambar 7. Diameter pipa setelah modifikasi

Sebelum modifikasi, seluruh segmen jaringan menggunakan pipa berdiameter 16 mm. Pada Gambar 7 menunjukkan modifikasi diameter pada saluran primer khusus pada segmen P-1 hingga P-4 diperbesar menjadi 32 mm, sedangkan P-5 dan P-6 menjadi 25 mm. Debit setelah modifikasi jaringan dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Debit air setelah modifikasi jaringan

Distribusi debit pada jaringan setelah modifikasi diameter menunjukkan pemerataan aliran yang lebih baik. Dibandingkan dengan kondisi awal, perubahan diameter saluran primer khususnya pada P-1 dan P-2, secara signifikan meningkatkan keseragaman debit di saluran sekunder dan tersier. Setelah modifikasi, debit pada saluran sekunder (S1-S7) seragam pada 0,04 L/s, mengatasi variasi debit yang sebelumnya menyebabkan ketidakseimbangan distribusi air. Visualisasi perbandingan sebelum dan sesudah modifikasi dapat dilihat pada *plot scatter* di Gambar 9.



Gambar 9. Distribusi debit sebelum dan sesudah modifikasi

Tabel 5. Rata-rata penurunan *head loss*

No.	Titik	Kategori Pipa	<i>Head loss</i> Sebelum (m)	<i>Head loss</i> Sesudah (m)	Rata-rata % penurunan hl
1	In	<i>Inlet</i>	1.541	0.062	
2	P-1	Primer	0.127	0.005	
3	P-2		0.137	0.007	
4	P-3		0.092	0.004	
5	P-4		0.117	0.006	
6	P-5		0.020	0.002	
7	P-6		0.042	0.006	
8	S-1	Sekunder	0.208	0.127	
9	S-2		0.207	0.132	
10	S-3		0.117	0.118	69.72%
11	S-4		0.096	0.129	
12	S-5		0.051	0.060	
13	S-6		0.064	0.131	
14	S-7		0.052	0.061	
15	T-1	Tersier	0.007	0.006	
16	T-2		0.005	0.006	
17	T-3		0.008	0.006	
18	T-4		0.009	0.004	
19	T-5		0.012	0.007	

Berdasarkan gambar tersebut, perbedaan warna menggambarkan hierarki saluran dalam jaringan distribusi air. Area hijau untuk saluran primer, merah untuk saluran sekunder, dan kuning untuk saluran tersier. Setelah modifikasi, debit pada saluran primer tetap besar meski sedikit berubah, sedangkan pada saluran sekunder debit menjadi seragam di angka 0,04 L/s. Untuk saluran tersier, debit kini rata di 0,02 L/s, menunjukkan peningkatan pemerataan distribusi. Kondisi ini memungkinkan aliran air yang lebih adil, terutama pada lahan yang bergantung pada saluran sekunder.

Efektivitas Modifikasi Jaringan dalam Mengurangi Head loss

Efektivitas modifikasi jaringan dievaluasi berdasarkan kemampuannya dalam menurunkan head loss secara keseluruhan. Head loss yang tinggi mencerminkan tingginya hambatan aliran, yang dapat mengurangi efisiensi sistem, terutama pada area yang jauh dari sumber air. Evaluasi dilakukan dengan menggunakan persamaan (7), dan hasilnya disajikan dalam Tabel 5.

Berdasarkan Tabel 5, modifikasi jaringan berhasil menurunkan rata-rata head loss hingga 69,72%, yang menunjukkan pengurangan hambatan aliran yang signifikan. Sebagai contoh, pada saluran primer seperti segmen P-1, head loss menurun drastis dari 0,127 m menjadi 0,005 m setelah modifikasi. Penurunan ini terutama disebabkan oleh pembesaran diameter pipa utama, sejalan dengan prinsip Darcy-Weisbach yang menyatakan bahwa head loss berbanding terbalik dengan pangkat empat diameter pipa [18].

Namun demikian, tidak semua segmen menunjukkan penurunan head loss. Beberapa saluran sekunder dan tersier, seperti segmen S-3 hingga T-3, justru mengalami peningkatan head loss setelah modifikasi. Fenomena ini kemungkinan disebabkan oleh redistribusi tekanan yang tidak merata akibat perubahan konfigurasi pada pipa utama. Modifikasi pada saluran primer dapat meningkatkan tekanan lokal di titik-titik tertentu, yang kemudian mendorong aliran lebih besar ke beberapa cabang sekunder atau tersier. Akibatnya, peningkatan debit lokal ini menyebabkan peningkatan kecepatan aliran dan pada akhirnya meningkatkan head loss sesuai dengan formulasi Darcy-Weisbach, di mana head loss juga berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan [19].

Pada saluran tersier seperti T-1, penurunan head loss relatif kecil, yang sejalan dengan karakteristik pipa berdiameter kecil yang memiliki resistansi tinggi terhadap aliran. Hal ini menunjukkan bahwa pada pipa berukuran kecil, perubahan tekanan akibat modifikasi tidak secara signifikan mengubah pola kehilangan energi. Dengan demikian, meskipun modifikasi secara umum terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi sistem irigasi, hasil ini juga menggarisbawahi pentingnya mempertimbangkan dampak redistribusi tekanan secara menyeluruh. Jika tidak direncanakan dengan cermat, modifikasi justru dapat menciptakan ketidakseimbangan tekanan dan potensi kerugian energi baru pada cabang tertentu. Oleh karena itu, analisis sistem perlu dilakukan secara komprehensif sebelum implementasi modifikasi di lapangan.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menunjukkan akurasi *software* EPANET dalam kemampuannya mewakili kondisi asli jaringan. Penerapan *software* EPANET dalam melakukan simulasi untuk memodifikasi jaringan memungkinkan optimasi tanpa intervensi fisik yang mahal dan kompleks, hal ini memungkinkan pembuatan rancangan modifikasi untuk meminimalisir kerugian dan kegagalan pada jaringan di lahan. Namun, penelitian ini memerlukan adaptasi desain dengan pertimbangan dampak redistribusi lain misalnya tekanan dan kecepatan, serta masih terbatas di beberapa aspek, seperti modifikasi terbatas pada perbesaran diameter dan keterbatasan informasi demand. Oleh karena itu, penelitian ini membuka peluang aplikatif untuk meningkatkan kinerja jaringan lain tidak hanya jaringan irigasi saja.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. J. Kodoatie, Tata Ruang Airtanah. Yogyakarta: C.V ANDI OFFSET, 2012.
- [2] W. Wasposito, "Analisa head loss sistem jaringan pipa pada sambungan pipa kombinasi diameter berbeda," *Suara Teknik: Jurnal Ilmiah*, vol. 8, no. 1, pp. 1-12, 2017, doi: 10.29406/stek.v8i1.534.
- [3] A. Nugraha, T. Priangkoso, and Y. Sumaryo, "Kaji eksperimental head loss pada gate valve dan ball valve," *Prosiding Seminar Nasional NCIET*, vol. 1, no. 1, pp. 397-405, 2020, doi: 10.32497/nciet.v1i1.144.
- [4] H. Alkindi, H. Santosa, and E. Sutoyo, "Analisis head losses pada circulating fluida air dalam dua jenis pipa,"

- Aplikasi Mekanika dan Energi*: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, vol. 9, no. 1, pp. 51-56, 2023.
- [5] B. R. Munson, T. H. Okiishi, W. W. Huebsch, and A. P. Rothmayer, *Fundamentals of Fluid Mechanics* Seventh Edition. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
 - [6] D. Pratama, K. Hadiningrum, and R. F. Muldiani, "Studi awal pengaruh temperatur terhadap karakteristik aliran fluida pada belokan pipa 90° melalui simulasi," *Jurnal MIPA*, vol. 11, no. 2, p. 68, 2022, doi: 10.35799/jm.v11i2.41826.
 - [7] J. Sinaga, D. Sinaga, and M. S. Tarigan, "Analisa pendistribusian air untuk memenuhi kebutuhan di kompleks Perumahan Karyawan Pt.Toba Pulp Lestari," *Jurnal Teknologi Mesin UDA*, vol. 2, no. 2, pp. 27-31, 2021.
 - [8] M. A. Rafiq, "Perbandingan simulasi debit aliran pipa dengan persamaan Darcy-Weisbach dan Hazen-Williams," *SKRIPSI*, p. 15, 2022.
 - [9] M. Luthfi and T. Yulianto, "Rancang bangun prototipe fluid friction apparatus untuk menganalisis kehilangan energi (*head loss*) dengan varias diameter pipa," *Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil (Proteksi)*, vol. 5, no. 1, pp. 29-35, 2023, doi: 10.26740/proteksi.v5n1.p29-35.
 - [10] Z. Kowalczyk and M. S. Tatara, "Improved model of isothermal and incompressible fluid flow in pipelines versus the Darcy-Weisbach equation and the issue of friction factor," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 891, 2020, doi: 10.1017/jfm.2020.131.
 - [11] S. Haji, F. Mahmud, and K. W. Widiatmoko, "Analisis pengembangan jaringan pengairan dengan program epanet dalam memenuhi kebutuhan air pada kebun alam regeneratif Sekolah Alam Ar Ridho Semarang," *Journal of Civil Engineering and Technology Sciences*, vol. 03, no. 01, pp. 1-8, 2024.
 - [12] D. Mehta, K. Prajapati, S. Verma, and V. Kumar, "Analysis of water distribution network using epanet: a case study of variav headwork Surat-India," *Larhyss Journal*, vol. 2024, no. 57, pp. 81-100, 2024.
 - [13] A. Admin *et al.*, "Rancang bangun visualisasi aliran air di dalam pipa tubular dengan vortex generator untuk meningkatkan sifat turbulensi fluida," *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, vol. 7, no. 2, pp. 205-215, 2021, doi: 10.56521/teknika.v7i2.321.
 - [14] Donda, D. Paranita, and D. F. Simatupang, "Analysis of pressure loss for treatment process of demineralized water at the water treatment plant unit at PT. ABC North Sumatra," *JUSTEK: Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 7, no. 1, pp. 11-17, 2024.
 - [15] K. Ramadhan and D. Prumanto, "Analisis kebutuhan pompa reservoir untuk supplyair ke WTP (*Water Treatment Plan*) di PDAM dengan kapasitas 200 L/S," *Jurnal Kalpika*, vol. 17, no. 1, pp. 36-48, 2020.
 - [16] J. C. Agunwamba, O. R. Ekwule, and C. C. Nnaji, "Performance evaluation of a municipal water distribution system using waterCAD and Epanet," *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development*, vol. 8, no. 3, pp. 459-467, Sep. 2018, doi: 10.2166/washdev.2018.262.
 - [17] R. N. Armanto and H. Indarjanto, "Analisis dan perencanaan pengembangansistem distribusi air minum di PDAM Unit Plosowahyu Kabupaten Lamongan," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 5, no. 2, 2016.
 - [18] B. S. M. Naibaho, N. D. Marpaung, and P. M. Naibaho, "Penyebaran kecepatan air dengan diameter pipa Dn 250 , Dn 200 dan Dn 150 pada inlet dan outlet dengan elbow 45 0 antara pipa horizontal dan pipa miring pada tinggi slope 7 M," *Jurnal Sains dan Teknologi ISTP*, vol. 22, no. 02, pp. 126-130, 2025.
 - [19] R. Gifary, A. D. Candra, Y. U. Andrianingtyas, B. Zaid, and Ariadji, "Analisa simulasi hysys untuk mengetahui hubungan diameter pipa terhadap *pressure drop* dan *velocity*," *Jurnal Eksplorasi dan Produksi Migas*, vol. 3, no. 2, pp. 1-6, 2025.