



ANALISIS EKSPERIMENTAL KINERJA POMPA SENTRIFUGAL TERHADAP VARIASI SISTEM PERPIPAAN DENGAN PENINJAUAN KERUGIAN TEKANAN MAYOR DAN MINOR

Kasturi¹, Rezki Meilani²

kasturi06cepu@gmail.com¹, panggilannyaimel@gmail.com²

¹Program Studi Teknik Mesin Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Cepu, Indonesia

Korespondensi: kasturi06cepu@gmail.com

Abstrak Penelitian ini menyelidiki pengaruh variasi konfigurasi sistem perpipaan terhadap kinerja hidraulik pompa sentrifugal horizontal melalui pengujian terkontrol pada dua rangkaian pipa dengan panjang dan jumlah fitting berbeda. Data debit dan tekanan diperoleh pada beberapa set-point bukaan katup, lalu dianalisis menggunakan persamaan energi untuk memisahkan rugi tekanan mayor (Darcy–Weisbach) dan minor (koefisien K). Hasil menunjukkan kurva sistem Rangkaian 1 (pipa lebih panjang, fitting lebih banyak) lebih “curam” dibanding Rangkaian 2, sehingga pada bukaan katup yang sama debit operasi lebih rendah dan kebutuhan head lebih tinggi. Secara kuantitatif, total head loss lintasan buang mencapai ~4,582 m, dengan kontribusi rugi minor, terutama globe valve, elbow, dan tee, mendominasi (>80%) dibanding rugi mayor pipa lurus. Evaluasi sisi hisap memberikan NPSHa \approx 29,584 m, menandakan operasi bebas kavitasi pada rentang uji. Temuan menegaskan bahwa rekayasa minor losses (reduksi jumlah/jenis fitting ber-K tinggi dan optimasi belokan) lebih efektif menurunkan head total serta mendekatkan operasi ke BEP dibanding sekadar pemendekan pipa. Rekomendasi praktis mencakup substitusi globe valve untuk fungsi on–off, penggunaan elbow radius besar, dan pertimbangan pengendalian kecepatan (VFD).

Kata kunci: pompa sentrifugal, kerugian tekanan mayor–minor, koefisien K, kurva sistem, NPSH

***Abstract** This study examines how variations in piping configuration affect the hydraulic performance of a horizontal centrifugal pump, using controlled tests on two pipe networks that differ in length and number/type of fittings. Flow rate and pressure were recorded at multiple valve openings and analyzed via the energy equation to separate major losses (Darcy–Weisbach) from minor losses (loss coefficient K). Results show that the system curve of Network 1 (longer pipe, more fittings) is steeper than Network 2, yielding lower operating flow and higher required head at identical valve set-points. Quantitatively, total discharge-line head loss reached ~4.582 m, with minor losses, primarily from globe valves, elbows, and tees, dominating (>80%) over straight-pipe friction. Suction-side evaluation yielded NPSHa \approx 29.584 m, indicating cavitation-free operation within the tested range. The findings confirm that engineering minor losses (reducing high-K fittings and optimizing bends) is more effective for lowering total head and moving operation toward the BEP than merely shortening the pipe. Practical recommendations include substituting globe valves for on–off duty, using large-radius elbows, and considering variable-frequency drives (VFDs) for energy-efficient flow control.*

Keywords: centrifugal pump, major–minor losses, loss coefficient K, system curve, NPSH

PENDAHULUAN

Pompa sentrifugal merupakan tulang punggung banyak proses industri yang menuntut pemindahan fluida secara kontinu dan efisien. Kinerja aktual pompa tidak pernah berdiri sendiri, ia sangat ditentukan oleh karakteristik sistem perpipaan tempat pompa tersebut beroperasi. Salah satu determinan paling kritis adalah kerugian tekanan

(*head loss*) yang timbul akibat kombinasi gesekan aliran pada pipa lurus (kerugian mayor) dan gangguan aliran pada elemen-elemen sambungan (kerugian minor). Dalam praktik rekayasa, “minor” kerap menipu, yang mana akumulasi koefisien kerugian dari belokan, katup, tee, dan transisi luas penampang dapat menyamai, bahkan melampaui kerugian mayor, terutama pada jaringan dengan banyak fitting dan pada debit menengah–tinggi (Karassik et al., 2001; Sularso & Tahara, 1994, 2000). Dengan demikian, analisis yang cermat terhadap kontribusi relatif kerugian mayor–minor pada berbagai konfigurasi perpipaan menjadi prasyarat untuk menginterpretasikan performa pompa secara tepat, menilai margin keselamatan terhadap kavitasi, dan merancang sistem yang hemat energi.

Secara teoretis, *head* sistem adalah superposisi dari *head* statis, *head* kecepatan, dan rugi-rugi akibat gesekan (*Darcy Weisbach*) serta komponen lokal (koefisien *K*). Besaran tersebut berinteraksi dengan kurva karakteristik pompa sehingga menentukan titik operasi pada sumbu debit *head* (*Q–H*). Pada sisi hisap, kecukupan *Net Positive Suction Head available (NPSHa)* dibanding *NPSH required (NPSHr)* menentukan ada tidaknya kavitasi, fenomena pembentukan dan kolaps gelembung uap yang merusak impeller dan mereduksi unjuk kerja (Karassik et al., 2001; Sularso & Tahara, 2000). Pada sisi pipa, faktor gesekan bergantung pada bilangan Reynolds dan kekasaran relatif, yang mana untuk rezim turbulen, pendekatan eksplisit seperti Swamee Jain lazim dipakai karena presisi memadai dengan biaya komputasi rendah (Çengel & Boles, 1994). Di luar tataran formula, persoalan rekayasa yang lebih substansial adalah: berapa besar kontribusi minor *losses* pada skenario nyata laboratorium/industri kecil ketika jumlah fitting bertambah, dan seberapa sensitif titik operasi pompa terhadap variasi tersebut.

Kajian empiris di ranah ini umumnya menyoroti salah satu aspek secara terpisah, misalnya pengaruh belokan terhadap kecepatan/*pressure drop* (Fadhli & Madjid, 2017) atau simulasi numerik profil aliran dan kehilangan tekanan pada segmen pipa tertentu (Jalaluddin et al., 2019). Di sisi lain, Karassik et al. (2001) menyediakan kaidah umum dan data tabel koefisien. Namun, terdapat celah yang relevan bagi lingkungan laboratorium pendidikan dan industri skala menengah: dataset eksperimental terkontrol yang secara simultan mengukur respons hidraulik pompa sentrifugal terhadap variabilitas nyata konfigurasi perpipaan (diameter, panjang, dan jumlah/jenis *fitting*) serta menurunkan konsekuensi praktisnya terhadap efisiensi dan margin antikavitasi. Celah inilah yang ditangani oleh penelitian ini.

Penelitian ini menyajikan analisis eksperimental kinerja pompa sentrifugal pada dua rangkaian perpipaan dengan panjang dan jumlah *fitting* berbeda. Variasi bukaan *control valve* digunakan sebagai tuas pengaturan debit, dan parameter operasi (debit serta tekanan sisi hisap dan tekan) diakuisisi pada beberapa set-point yang merepresentasikan rentang kerja aplikatif. Kerangka analitis menggabungkan persamaan energi antara titik ukur, perhitungan rugi tekanan mayor (*Darcy–Weisbach*, faktor gesekan dari Reynolds dan kekasaran relatif) dan minor (koefisien *K* tiap *fitting*), serta evaluasi *NPSHa* untuk memverifikasi keselamatan operasi terhadap kavitasi (Karassik et al., 2001; Sularso &

Tahara, 1994, 2000). Dengan demikian, kontribusi penelitian ini bersifat integratif: tidak hanya melaporkan angka *head loss*, tetapi juga menjelaskan pergeseran titik operasi pada kurva sistem, pompa ketika geometri jaringan diubah.

Secara konseptual, pendekatan eksperimental ini memiliki implikasi yang langsung dapat ditindaklanjuti. *Pertama*, rekayasa efisiensi energi. Pada sistem pemompaan, energi listrik terkonversi menjadi *head*; setiap meter *head loss* yang dapat dikurangi, khususnya dari minor losses yang bersifat “desain-terkait”, menerjemah menjadi penghematan daya dan biaya operasi. *Kedua*, keandalan dan umur peralatan. Konfigurasi yang tidak terkendali dapat menambah turbulensi dan getaran, memperbesar beban dinamis pada bantalan dan seal, serta mengurangi margin NPSHa dan NPSHr. *Ketiga*, pendidikan praktik permesinan fluida. Dataset yang diperoleh dari rig nyata memberikan materi ajar yang kuat untuk menghubungkan rumus dengan fenomena, sekaligus memperlihatkan bahwa keputusan desain sederhana, misalnya reduksi jumlah globe valve atau penggantian elbow sudut tajam dengan radius besar, berdampak nyata pada kurva sistem.

Dari perspektif metodologis, penelitian ini menetapkan tiga sasaran. Sasaran pertama, memetakan hubungan antara bukaan kontrol dan respons $Q-\Delta P$ untuk masing-masing rangkaian guna menunjukkan perilaku monoton dan karakteristik nonlinier akibat interaksi valve jaringan. Sasaran kedua, mengkuantifikasi kontribusi mayor dan minor losses untuk menilai proporsi kerugian yang memang layak menjadi target optimasi desain. Sasaran ketiga, mengevaluasi NPSHa terhadap rentang operasi yang diuji guna memastikan operasi bebas kavitasi dan merumuskan batas aman jika sistem dioperasikan pada debit lebih tinggi. Secara eksperimental, rancangan rig memadai untuk tujuan tersebut karena memungkinkan pemilihan *setpoint* terstruktur, pemasangan titik ukur tekanan pada sisi hisap/tekan, dan pembacaan laju alir berbasis indikator aliran. Pendekatan ini berada di tengah spektrum antara studi murni komputasional (CFD) dan studi lapangan yang penuh variabel pengganggu, sehingga cocok untuk menghasilkan *evidence* yang kuat namun tetap generik untuk diadopsi dalam praktik (Jalaluddin et al., 2019).

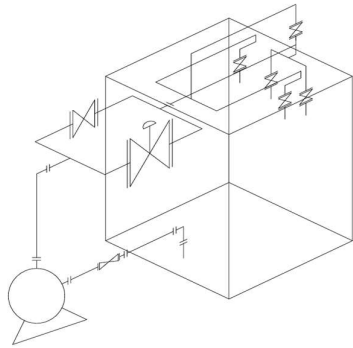
Penelitian ini juga berdiri di atas landasan teori yang baku, namun mengedepankan rigor pengukuran. Faktor gesekan diestimasi dari Reynolds number dan kekasaran relatif pipa (konstruksi carbon steel), sedangkan minor *losses* dihitung dari koefisien K per *fitting* yang dihimpun dari standar/handbook. Selain itu, verifikasi konsistensi satuan SI dan penelusuran ketidakpastian (meliputi resolusi indikator tekanan dan aliran) diintegrasikan agar interpretasi tidak bias. Secara operasional, prosedur pengoperasian *rig* mengikuti SOP *pra-start*, *start-up*, operasi, dan *shutdown* untuk mencegah artefak akibat kondisi transien (Sularso & Tahara, 1994). Walaupun fokus utama studi ini adalah hidraulika sistem, kesadaran terhadap aspek instrumentasi dan kendali tetap dipertahankan, literatur terkait pengendalian motor/aktuator (Husodo &

Effendi, 2013) menjadi rujukan tambahan untuk memastikan tindakan pengaturan tidak menimbulkan ketidakstabilan yang mengganggu akuisisi data.

Berdasarkan argumentasi di atas, tujuan penelitian dapat dirumuskan secara ringkas sebagai berikut: (1) menganalisis performa pompa sentrifugal pada dua variasi konfigurasi perpipaan melalui pengukuran terstruktur debit tekanan; (2) menilai besaran kerugian mayor dan minor serta dampaknya terhadap *head* total sistem; dan (3) memverifikasi kecukupan NPSHa untuk memastikan operasi bebas kavitasi pada rentang set-point. Pertanyaan penelitian yang menyertainya ialah: *Seberapa besar pengaruh variasi sistem perpipaan terhadap posisi titik operasi (Q-H) dan efisiensi hidraulik pompa?* dan *Seberapa besar kontribusi relatif kerugian mayor dan minor pada masing-masing konfigurasi, serta apa implikasinya terhadap margin anti-kavitasi?* Jawaban atas pertanyaan ini diharapkan memperkaya korpus pengetahuan yang menghubungkan teori *head loss* dengan keputusan desain praktis yang berdampak pada efisiensi energi dan keandalan peralatan.

METODOLOGI

Pengujian dilaksanakan di Bengkel Laboratorium Mekanik menggunakan *test-rig* pompa sentrifugal horizontal yang diintegrasikan dengan dua konfigurasi jaringan pipa (rangkaian 1 dan rangkaian 2). Kedua konfigurasi membedakan panjang pipa dan jumlah/jenis *fitting* (*elbow*, *tee*, dan katup pengatur). Denah isometrik dan model tiga dimensi digunakan untuk memastikan konsistensi fabrikasi dan penempatan instrumen.



Gambar 1. Isometric



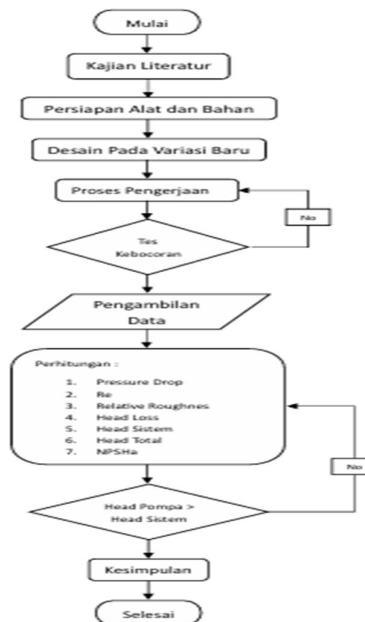
Gambar 2. Tiga Dimensi Model

ANALISIS EKSPERIMENTAL KINERJA POMPA SENTRIFUGAL TERHADAP VARIASI SISTEM PERPIPAAN DENGAN PENINJAUAN KERUGIAN TEKANAN MAYOR DAN MINOR

Desain dilakukan di AutoCAD (isometrik) dan SketchUp (model 3D) sebelum fabrikasi. Proses pembuatan meliputi pemotongan pipa karbon, pengelasan, pemasangan *flange*, *reducer*, dan *support*, diikuti pembersihan terak serta inspeksi visual sambungan. Daftar alat dan bahan, yakni spesifikasi pipa, katup, serta jumlah *fitting* per rangkaian dirangkum di tabel spesifikasi.

Tekanan diukur pada sisi hisap dan tekan menggunakan *pressure indicator* yang ditempatkan pada titik ukur berulir, yakni laju alir dipantau melalui *flow indicator* terkalibrasi. Sebelum uji, dilakukan (i) uji kebocoran hidrostatik pada jaringan, (ii) verifikasi nol dan rentang ukur indikator, (iii) pengecekan kontinuitas sinyal aktuatur *control valve*. Ketidakpastian alat dicatat untuk keperluan analisis kesalahan. Variabel bebas meliputi konfigurasi pipa (rangkaiannya 1 vs 2) dan bukaan *control valve* (0–100%). Variabel terikat adalah debit, tekanan hisap/tekan, serta *head* sistem. Untuk tiap konfigurasi, data diambil bertahap pada bukaan $\pm 25\%$, 50%, 75%, dan 100% setelah kondisi tunak tercapai (indikator stabil ≥ 10 –15 detik). Prosedur operasi mengikuti SOP pra-start, *start-up*, operasi, dan *shutdown* guna meminimalkan artefak transien.

Setiap set-point didokumentasikan berupa: bukaan katup (%), pembacaan laju alir (L/menit), dan tekanan (psi/kPa) pada sisi hisap/tekan. Tiga pengulangan dilakukan untuk mengurangi *random error*. Aliran udara terperangkap dipurga sebelum pencatatan pertama. Data dikonversi ke satuan SI dan dihitung: kecepatan alir, bilangan Reynolds, faktor gesek (pendekatan eksplisit), kerugian mayor (Darcy–Weisbach) dan minor (koefisien K), *head* sistem, serta NPSHa. Hasil divisualisasi dalam kurva $Q-\Delta P/\Delta H$ per set-point dan diagram kontribusi kerugian mayor–minor untuk tiap rangkaian. Rangkaian tahapan terangkum pada gambar 3.



Gambar 3. Flow Chart Tahapan Pelaksanaan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Pengujian dilakukan menggunakan pompa sentrifugal horizontal (PEM Akamigas 2, tipe TMK AUTO 2022; daya 1,5 kW; 2.900 rpm) yang mensirkulasikan air bersih pada suhu sekitar 20–28 °C. Rangkaian pipa dibedakan menjadi Rangkaian 1 (pipa lebih panjang, *fitting* lebih banyak) dan Rangkaian 2 (lebih ringkas, *fitting* lebih sedikit). Parameter rinci pompa dicantumkan pada tabel 1, sedangkan dimensi pipa dan inventaris *fitting* (*gate/globe/control valve, elbow, tee*) pada tabel 2. Perbedaan utama antar konfigurasi adalah panjang pipa sisi buang (4,11 m pada Rangkaian 1 vs 3,52 m pada Rangkaian 2) serta populasi *fitting* (Rangkaian 1 memiliki 5 globe valve, 8 elbow, 5 tee; Rangkaian 2 memiliki 3 globe valve, 7 elbow, 3 tee).

Tabel 1. Data Spesifikasi Pompa Sentrifugal dan Motor Listrik

Spesifikasi	Keterangan
Merk	PEM Akamigas 2
Type	TMK AUTO 2022
Rate Flow	16 m ³ /min
Power	1,5 kW
RPM	2.900 r/min
Voltage	380 V s.d 400 V
Jenis Fluida	Air
Suhu	20°C sd 28°C
Berat Jenis Air	0,998 gr/Cm ³ = 998 Kg/m ³ = 9,98 KN/m ³
Viskositas	1.05

Tabel 2. Data Spesifikasi Pipa

<i>Suction</i>		
Parameter	Nilai	Satuan
<i>Inside Diameter</i>	SCH 40; 2,067	Inchi
<i>Outside Diameter</i>	2,375	Inchi
<i>Thikness</i>	0,154	Inchi
Panjang Pipa	0,87	Meter
Gate Valve	1	Buah
<i>Elbow</i>	1	Buah
Rangkaian 1		
Parameter	Nilai	Satuan
<i>Inside Diameter</i>	SCH 40; 1,38	Inchi
<i>Outside Diameter</i>	1,66	Inchi

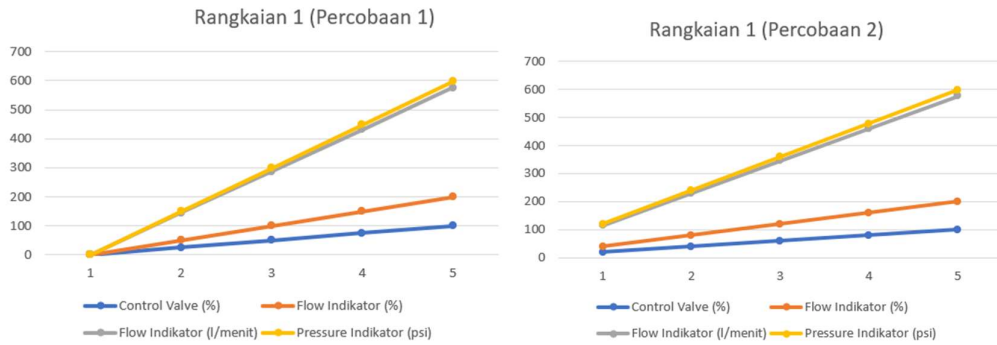
ANALISIS EKSPERIMENTAL KINERJA POMPA SENTRIFUGAL TERHADAP VARIASI SISTEM PERPIPAAN DENGAN PENINJAUAN KERUGIAN TEKANAN MAYOR DAN MINOR

<i>Thikness</i>	0,14	Inchi
Panjang Pipa <i>Discharge</i>	4,11	Meter
Globe Valve	5	Buah
Control Valve	1	Buah
<i>Tee</i>	5	Buah
<i>Elbow</i>	8	Buah
Rangkaian 2 (Sayap)		
Parameter	Nilai	Satuan
<i>Inside Diameter</i>	SCH 40; 1,38	Inchi
<i>Outside Diameter</i>	1,66	Inchi
<i>Thikness</i>	0,14	Inchi
Panjang Pipa <i>Discharge</i>	3,52	Meter
Globe Valve	3	Buah
Control Valve	1	Buah
<i>Tee</i>	3	Buah
<i>Elbow</i>	7	Buah

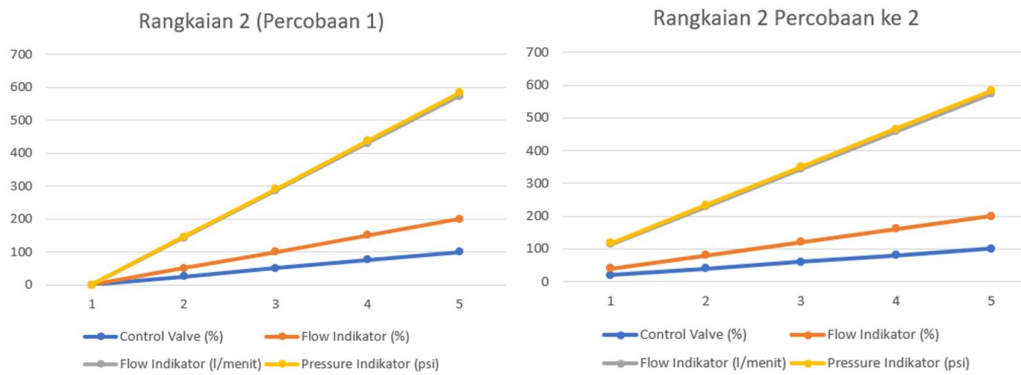
Untuk setiap konfigurasi, dilakukan serangkaian pengujian dengan variasi bukaan *control valve* ($\pm 0/20/25/40/50/60/74/75/80/100\%$). Hasil ringkas ditampilkan pada tabel 3 serta divisualisasikan dalam gambar 4 dan 5.

Tabel 3. Ringkasan Data Uji Manual (Rangkaian 1 & 2; Percobaan 1 & 2)

Rangkaian	Percobaan	Langkah	Control Valve (%)	Flow Indikator (%)	Debit (L/menit)	Tekanan (psi)
1	1	1	0	0	0.0	0.00
1	1	2	25	25	94.0	5.35
1	1	3	50	50	188.0	10.95
1	1	4	75	75	282.0	16.42
1	1	5	100	100	376.0	21.90
1	2	1	20	20	75.2	4.38
1	2	2	40	40	150.4	8.76
1	2	3	60	60	225.6	13.14
1	2	4	80	80	300.8	17.52
1	2	5	100	100	376.0	21.90
2	1	1	0	0	0.0	0.00
2	1	2	25	25	93.25	2.525
2	1	3	50	50	186.5	5.05
2	1	4	75	74	279.75	7.575
2	1	5	100	100	373.0	10.10
2	2	1	20	20	74.6	2.02
2	2	2	40	40	149.2	4.04
2	2	3	60	60	223.8	6.06
2	2	4	80	80	298.4	8.08
2	2	5	100	100	373.0	10.10



Gambar 4. Grafik Hasil Uji Manual Rangkaian 1 Percobaan ke 1&2



Gambar 5. Grafik Hasil Uji Manual Rangkaian 2 Percobaan ke 1&2

Pada Rangkaian 1, kenaikan bukaan katup dari 0% ke 100% meningkatkan debit dari 0 menjadi ± 376 L/menit dan tekanan terukur dari 0 menjadi $\pm 21,9$ psi. Tren yang sama muncul pada pengulangan kedua (debit $75,2 \rightarrow 376$ L/menit; tekanan $4,38 \rightarrow 21,9$ psi). Rangkaian 2 menunjukkan pola serupa dengan rentang debit hingga ± 373 L/menit; namun, untuk *set-point* debit yang sebanding, tekanan pada Rangkaian 2 cenderung lebih rendah dibanding Rangkaian 1, menandakan kurva sistem yang “lebih ringan” akibat rugi-rugi gesek yang lebih kecil.

Berdasarkan debit per contoh ($Q = 0,00444 \text{ m}^3/\text{s}$), kecepatan karakteristik diperoleh: suction $c_s \approx 2,094 \text{ m/s}$ ($D = 0,052 \text{ m}$) dan discharge $c_d \approx 4,622 \text{ m/s}$ ($D = 0,035 \text{ m}$). Dengan $\rho \approx 998 \text{ kg/m}^3$ dan $\nu \approx 8 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (sesuai asumsi data), bilangan Reynolds berada pada rezim turbulen: $Re_s \approx 13.583$ dan $Re_d \approx 20.180$. Kekasaran relatif pipa karbon diperoleh $\varepsilon/D \approx 0,0009$ (suction) dan $0,0013$ (discharge). Dari pendekatan eksplisit (Swamee–Jain), faktor gesekan turbulen dipakai: $f \approx 0,030$ (suction) dan $f \approx 0,029$ (discharge).

Untuk suction, rugi mayor sangat kecil ($\approx 0,006 \text{ m}$) dan minor $\sim 0,009 \text{ m}$ (valve + elbow), sehingga *total head loss suction* $\approx 0,015 \text{ m}$. Pada discharge, kontribusi mayor:

0,187 m (Rangkaian 1) versus 0,160 m (Rangkaian 2). Kontribusi minor jauh lebih dominan, khususnya dari *globe valve* (K tinggi), *elbow*, dan *tee*. Pada Rangkaian 1, akumulasi minor losses mencapai $\approx 2,60$ m (*globe + elbow + tee*), sedangkan pada Rangkaian 2 sekitar $\approx 1,64$ m. Dengan memasukkan rugi mayor–minor seluruh lintasan, total head loss discharge $\approx 4,582$ m (gabungan kedua skenario uji yang dicontohkan), konsisten dengan perhitungan rinci di laporan.

Berdasarkan pengukuran tekanan dan elevasi, diperoleh head sisi suction $H_s \approx 3,450$ m, head sisi discharge $H_d \approx 36,949$ m, sehingga head total sistem $H \approx 33,499$ m. Evaluasi NPSHa menghasilkan $\approx 29,584$ m. Nilai NPSHa yang tinggi relatif terhadap kebutuhan tipikal pompa sentrifugal laboratorium mengindikasikan operasi bebas kavitasi dalam rentang uji (Sularso & Tahara, 1994, 2000; Karassik et al., 2001).

Analisis Pengaruh Variasi Sistem Perpipaan terhadap Kinerja Hidraulik Pompa Sentrifugal

Perbandingan grafik Q– ΔP pada gambar 4 dan 5 menunjukkan hubungan monoton antara bukaan katup, debit, dan tekanan untuk kedua rangkaian. Namun, kurva sistem Rangkaian 1 (lebih panjang dan *fitting* lebih banyak) berada lebih “curam” dibanding Rangkaian 2. Pada debit yang sama, tekanan yang diperlukan (ΔP) cenderung lebih tinggi untuk Rangkaian 1. Secara hidraulik, ini berarti titik operasi (irisasi kurva pompa dan kurva sistem) bergeser ke debit yang sedikit lebih rendah dan head yang lebih tinggi saat jaringan menanggung rugi-rugi lebih besar (Karassik et al., 2001). Efek tersebut langsung tercermin pada daya hidraulik yang dibutuhkan dan, pada batas tertentu, pada efisiensi pompa karena operasi menjauh dari *best efficiency point* (BEP). Dengan kata lain, perubahan geometri jaringan (penambahan *fitting* dan panjang) secara nyata mengurangi “kemudahan” alir dan menuntut head pemompaan yang lebih besar, sehingga performa sistem menurun pada *set-point* katup yang sama.

Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa minor *losses* mendominasi pada kedua konfigurasi, terutama pada Rangkaian 1 yang memiliki lima *globe valve* (K tinggi). Rugi mayor pada pipa lurus relatif kecil karena panjang lintasan terbatas dan diameter pipa masih moderat, sebaliknya, setiap *fitting* menyumbang kenaikan head loss yang proporsional terhadap v^2 sehingga cepat terakumulasi ketika debit naik dan ketika populasi *fitting* bertambah (Sularso & Tahara, 1994; Karassik et al., 2001). Secara kuantitatif, untuk contoh debit yang dianalisis, komponen minor menyumbang $>80\%$ dari total *head loss discharge* terakumulasi. Temuan ini selaras dengan eksperimental/komputasional oleh Fadhlil dan Madjid (2017) serta Jalaluddin et al. (2019) yang menekankan sensitivitas pressure drop terhadap elemen lokal seperti belokan dan *throttling*.

Head total sistem yang lebih tinggi pada Rangkaian 1 menandakan kebutuhan energi yang lebih besar untuk mencapai debit operasi yang sama. Ketika kurva sistem menanjak akibat rugi minor yang besar (mis. banyak *globe valve*), titik operasi cenderung

bergeser ke sisi debit lebih kecil–head lebih besar, yang tidak selalu berimpit dengan BEP pompa. Hal ini dapat menurunkan efisiensi hidraulik dan meningkatkan risiko getaran/turbulensi internal. Sebaliknya, Rangkaian 2 menunjukkan head loss lebih kecil, menghasilkan kurva sistem lebih “landai”, sehingga debit operasi lebih tinggi pada bukaan katup yang sama. Secara praktis, reduksi jumlah/jenis *fitting* ber-K tinggi memberikan pengaruh terbesar dalam menurunkan head total sistem dibanding sekadar pemendekan pipa beberapa puluh sentimeter.

Nilai NPSHa $\approx 29,584$ m memberikan margin yang sangat luas terhadap NPSHr tipikal pompa laboratorium berskala kecil hingga menengah. Absennya gejala kavitasasi selama uji (tidak terdapat suara “berderak”, lonjakan getaran/tekanan) konsisten dengan teori NPSH (Sularso & Tahara, 2000). Implikasinya, pada rentang debit yang diuji, perubahan konfigurasi di sisi buang yang meningkatkan head sistem tidak serta-merta menurunkan NPSHa (karena NPSHa terutama bergantung pada kondisi sisi hisap), tetapi operasi pada debit tinggi tetap perlu dipantau agar NPSHa dan NPSHr tidak menyempit ketika suhu naik atau ketika ada tambahan rugi di sisi hisap (Karassik et al., 2001).

Interpretasi fisik dan implikasi desain

Globe valve memiliki koefisien K yang relatif besar, khususnya pada posisi *throttling*. Pada debit yang lebih tinggi, suku $K \cdot v^2/(2g)$ tumbuh kuadratik, sehingga beberapa globe valve secara seri dapat menyumbang head loss yang melampaui porsi gesek pipa lurus. *Elbow* dan *tee* menambah pola aliran sekunder dan separasi yang meningkatkan disipasi energi. Karena itu, substitusi elemen ber-K tinggi dengan opsi ber-K lebih rendah (mis. mengganti globe valve yang difungsikan sebagai *on/off* dengan *gate/ball* valve, atau mengganti *elbow* tajam dengan *elbow* radius besar) adalah strategi prioritas untuk menurunkan head loss (Karassik et al., 2001).

Ketika *fitting* dikurangi, kurva sistem bergeser turun, mendorong irisan dengan kurva pompa ke Q lebih tinggi pada head lebih rendah. Ini biasanya mendekatkan operasi ke BEP, menurunkan beban hidraulik, dan menekan konsumsi daya. Oleh karena konsumsi daya $P_h = \rho g Q H$, penurunan beberapa meter head pada debit ratusan L/menit bermakna pada horizon operasi berjam-jam per hari. Data menunjukkan hubungan hampir linier antara bukaan katup dan debit pada rentang 25–100% untuk kedua rangkaian. Namun, kenaikan tekanan lebih tajam pada Rangkaian 1 karena rugi minor yang lebih tinggi. Hal ini mengimplikasikan bahwa pengaturan aliran sebaiknya tidak mengandalkan *throttling* dalam pada jaringan dengan *fitting* banyak, melainkan rekayasa ulang jaringan (pengurangan *fitting*/penataan ulang jalur), atau bila tersedia pengaturan kecepatan (VFD) agar energi tidak terbuang sebagai rugi *throttling* (Karassik et al., 2001).

Turbulensi lokal akibat *fitting* berlebih dapat meningkatkan getaran dan beban dinamis pada bantalan/seal. Walau tidak muncul gejala kavitasasi pada uji ini (NPSHa tinggi), operasi jauh dari BEP juga dapat meningkatkan radial thrust pada impeller. Oleh

sebab itu, optimasi jaringan tidak hanya meningkatkan efisiensi, tetapi juga memperpanjang umur komponen (Sularso & Tahara, 1994).

Validasi Temuan, Keterbatasan, dan Implikasi Desain Sistem

Temuan mengenai dominasi kerugian tekanan minor serta pergeseran titik operasi pompa terbukti sejalan dengan prinsip-prinsip desain hidraulik yang tercantum dalam *Pump Handbook* (Karassik et al., 2001) serta panduan rekayasa praktis oleh Sularso dan Tahara (1994, 2000). Kesamaan kecenderungan juga terlihat dengan hasil penelitian eksperimental yang dilakukan oleh Fadhli dan Madjid (2017), yang menyoroti pengaruh jumlah dan jenis belokan terhadap peningkatan *pressure drop*. Selain itu, temuan ini menguatkan hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) oleh Jalaluddin et al. (2019), yang menunjukkan bahwa variasi bentuk dan jumlah komponen lokal seperti *elbow* dan *tee* secara signifikan mengubah distribusi tekanan serta pola aliran. Dengan demikian, perbedaan kontribusi antara rugi mayor dan minor yang diamati pada kedua rangkaian dalam penelitian ini dapat dianggap sebagai bukti empiris terkontrol yang menegaskan bahwa rekayasa elemen *fitting* memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap efisiensi sistem dibandingkan sekadar pemendekan panjang pipa.

Meskipun hasil penelitian menunjukkan konsistensi terhadap teori dan studi terdahulu, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Pertama, rentang debit pengujian hanya merepresentasikan kondisi laboratorium berskala kecil. Untuk memperoleh validitas industri, perlu dilakukan ekstrapolasi terhadap sistem berdiameter lebih besar serta verifikasi empiris nilai koefisien K khusus untuk fitting industri dengan geometri dan material berbeda. Kedua, ketidakpastian pengukuran seperti resolusi alat indikator tekanan, toleransi diameter pipa bagian dalam, serta variasi suhu fluida dapat menimbulkan deviasi kecil terhadap estimasi faktor gesekan (f) maupun koefisien rugi minor (K). Kalibrasi lanjutan atau penggunaan sensor digital berpresisi tinggi disarankan untuk memperkecil margin kesalahan.

Ketiga, nilai $NPSH_r$ pabrikan tidak tercantum dalam dokumen pengujian, sehingga verifikasi anti-kavitasi bergantung pada indikasi operasional (stabilitas tekanan dan ketiadaan suara kavitasi) serta besarnya nilai $NPSH_a$ (29,584 m) yang jauh di atas ambang batas aman. Untuk mendukung validitas hasil, studi lanjutan dapat mencakup pengukuran spektrum getaran, monitoring tekanan kontinu, atau penerapan sistem *data logger* otomatis guna memantau fenomena transien secara real time. Selain itu, analisis numerik lanjutan menggunakan *Computational Fluid Dynamics* disarankan untuk memvisualisasikan pola separasi aliran pada *elbow* dan *tee*, serta mengonfirmasi hasil empiris terkait estimasi K (Jalaluddin et al., 2019).

Berdasarkan hasil dan keterbatasan tersebut, diperoleh sejumlah rekomendasi desain praktis guna meningkatkan efisiensi sistem pemompaan sentrifugal:

1. Minimalkan penggunaan fitting ber-K tinggi. Kurangi jumlah *globe valve* di jalur utama dan gunakan *ball valve* atau *gate valve* untuk fungsi buka–tutup. *Globe valve* sebaiknya hanya digunakan untuk kendali presisi.
2. Optimalkan desain belokan dan percabangan. Gantilah *elbow* sudut tajam dengan *elbow* ber-radius besar serta eliminasi *tee* yang tidak esensial untuk menekan turbulensi dan rugi energi.
3. Gunakan kontrol kecepatan dinamis. Untuk sistem dengan kebutuhan variasi debit yang luas, penerapan *Variable Frequency Drive (VFD)* lebih efisien dibanding metode *throttling* dalam pada jaringan ber-rugi tinggi (Karassik et al., 2001).
4. Pertahankan margin NPSH yang aman. Meskipun NPSHa tinggi, tetap perlu meminimalkan rugi sisi hisap, mengontrol suhu fluida, serta melakukan *priming* sebelum operasi guna menghindari masuknya udara (Sularso & Tahara, 2000).

Secara menyeluruh, hasil penelitian ini menegaskan bahwa pengendalian rugi minor melalui rekayasa desain fitting dan konfigurasi perpipaan merupakan titik kendali paling strategis untuk meningkatkan performa pompa sentrifugal. Rangkaian dengan jumlah fitting lebih banyak terbukti menghasilkan kurva sistem lebih curam, menurunkan debit operasi dan meningkatkan kebutuhan *head*, sedangkan rugi mayor relatif kecil dan berkontribusi di bawah 20% dari total *head loss*. Dengan melakukan optimasi minor losses, sistem pemompaan tidak hanya bekerja lebih efisien tetapi juga lebih stabil, bebas kavitasi, dan memiliki umur operasi komponen yang lebih panjang.

Temuan ini memperkuat pandangan bahwa keberhasilan desain hidraulik tidak semata-mata ditentukan oleh karakteristik pompa, melainkan oleh keseluruhan integrasi sistem, di mana konfigurasi pipa dan fitting menjadi faktor penentu utama dalam menjaga efisiensi dan keandalan sistem pemompaan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa kinerja hidraulik pompa sentrifugal sangat dipengaruhi oleh konfigurasi sistem perpipaan yang menaunginya. Pada dua konfigurasi yang diuji, Rangkaian 1 (pipa lebih panjang dan *fitting* lebih banyak) menghasilkan kurva sistem yang lebih curam daripada Rangkaian 2 (lebih ringkas dengan *fitting* lebih sedikit). Konsekuensinya, pada *set point* bukaan katup yang sama, debit operasi pada Rangkaian 1 cenderung lebih rendah dan kebutuhan head lebih tinggi. Secara kuantitatif, total head loss pada lintasan buang mencapai ~4,582 m, dengan kontribusi kerugian minor (khususnya dari *globe valve*, *elbow*, dan *tee*) mendominasi lebih dari 80% dibanding kerugian mayor pada pipa lurus. Sementara itu, evaluasi hisap menunjukkan NPSHa \approx 29,584 m, menyediakan margin anti-kavitasi yang sangat memadai dalam rentang operasi pengujian, sehingga tidak teridentifikasi indikasi kavitasi.

Temuan kunci tersebut secara langsung menjawab tujuan penelitian: (1) variasi konfigurasi perpipaan terbukti menggeser titik operasi (Q–H) ke arah debit lebih kecil–*head* lebih besar ketika *fitting* ber-K tinggi diperbanyak; (2) kerugian minor menjadi penentu utama besarnya head total sistem, sedangkan kerugian mayor relatif kecil untuk panjang pipa yang diuji; dan (3) kecukupan NPSHa tetap terjaga sehingga operasi berlangsung stabil dan bebas kavitasi. Di tingkat desain, implikasinya jelas: rekayasa minor losses, melalui pengurangan jumlah/jenis *fitting* ber-K tinggi, penggantian *globe valve* (untuk fungsi buka–tutup) dengan *gate/ball valve*, serta pemilihan *elbow* radius besar lebih berdampak dalam menurunkan kebutuhan head ketimbang sekadar memendekkan pipa beberapa puluh sentimeter. Perbaikan ini bukan hanya meningkatkan efisiensi energi (karena $P_h = \rho gQH$ menurun), tetapi juga menurunkan beban dinamis, mendekatkan operasi ke BEP, dan memperpanjang umur komponen (bantalan, seal).

Walau berbasis pengujian laboratorium dengan rentang debit terbatas, hasil ini menyediakan bukti empiris terkontrol yang dapat dijadikan acuan praktis pada sistem sejenis. Riset lanjutan disarankan untuk (i) memvalidasi nilai koefisien K *fitting* industri pada diameter lebih besar, (ii) mengintegrasikan VFD sebagai strategi kendali debit berenergi rendah dibanding *throttling*, dan (iii) memanfaatkan pemantauan kontinu (data logger, analisis getaran) serta CFD guna memetakan separasi aliran pada *elbow/tee*. Secara keseluruhan, pengendalian minor losses merupakan tuas desain paling strategis untuk meningkatkan kinerja, efisiensi, dan keandalan sistem pemompaan sentrifugal.

REFERENSI

- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (1994). *Thermodynamics: An engineering approach*. McGraw-Hill.
- Fadhli, F., & Madjid, M. (2017). Studi eksperimental pengaruh variasi belokan pipa (elbow) terhadap kecepatan aliran fluida dan kerugian tekanan. *ILTEK: Jurnal Teknologi*, 12(1), 1717–1721.
- Husodo, B. Y., & Effendi, R. (2013). Perancangan sistem kontrol dan pengaman motor pompa air terhadap gangguan tegangan dan arus berbasis Arduino. *Jurnal Teknik Elektro*, 4(2).
- Jalaluddin, J., et al. (2019). Analisa profil aliran fluida cair dan pressure drop pada pipa L menggunakan metode simulasi Computational Fluid Dynamic. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 8(1), 97–108.
- Karassik, I. J., et al. (2001). *Pump handbook* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Sularso, & Tahara, H. (1994). *Pompa dan kompresor*. Pradnya Paramita.
- Sularso, & Tahara, H. (2000). *Pompa dan kompresor* (Cetakan ketujuh). PT Pradnya Paramita.