

Evaluasi Kuantitatif serta Analisis Kerugian Major dan Minor pada Sistem Perpipaan NaOH 29–31% di Chlor Alkali Plant PT X, Porsea

Samuel Gideon^{1*}, Yudika Chesy Betesda²

^{1,2} Politeknik Teknologi Kimia Industri Medan, Indonesia

Alamat: Jalan Medan Tenggara No.VII, Medan Tenggara, Kec. Medan Denai, Kota Medan, Sumatera Utara 20228

Korespondensi penulis: samuel_gideon@ptki.ac.id

Abstract. Accurate evaluation of head losses is essential in industrial systems transporting viscous chemical fluids, such as sodium hydroxide (NaOH), to ensure hydraulic efficiency and operational reliability, particularly in chlor alkali plants. This study analyses major and minor flow losses in the NaOH piping system at PT X Chlor Alkali Plant, Porsea, and evaluates the pipe design's hydraulic feasibility. After defining system parameters—including fluid properties, pipe geometry, and the number and type of fittings—technical calculations were conducted to assess flow profiles and pressure losses along two main pipe routes. A quantitative analysis using the Moody diagram and operational data reveals that minor losses dominate, contributing over 75% of total head loss in both routes. The total head loss remains within the pump's rated capacity (18 m), though with a narrow margin. A pipe diameter of 0.114 m produces a flow velocity of 0.79 m/s, aligning with recommended industrial standards for corrosive fluids. The use of Sch.80 stainless steel proves effective in minimizing frictional losses, particularly under turbulent flow conditions. These findings highlight the critical role of fitting configurations and material selection in optimizing chemical process piping systems.

Keywords: major head loss, minor head loss, total head loss.

Abstrak. Dalam banyak aplikasi industri, terutama sistem yang mengalirkan fluida kimia dengan viskositas tinggi, seperti larutan natrium hidroksida (NaOH), evaluasi rugi aliran total menjadi krusial untuk menjamin efisiensi sistem dan keandalan operasional, khususnya pada chlor alkali plant. Fokus utama dari penelitian ini adalah menganalisis karakteristik rugi-rugi aliran baik kerugian mayor maupun kerugian minor pada Chlor Alkali Plant di PT X Porsea serta mengevaluasi keandalan desain pipa dan kelayakan hidrolik nya berdasarkan distribusi rugi aliran serta kondisi aliran fluida. Setelah menetapkan parameter dasar sistem seperti jenis fluida, karakteristik geometrik pipa, serta jumlah dan jenis sambungan, maka perhitungan teknis dilakukan untuk mengevaluasi profil aliran dan rugi-rugi aliran dalam sistem. Metode yang digunakan meliputi analisis kuantitatif terhadap rugi aliran mayor dan minor pada dua jalur utama perpipaan menggunakan pendekatan diagram Moody dan data operasional aktual. Hasil menunjukkan bahwa kerugian minor mendominasi rugi-rugi aliran total, dengan kontribusi lebih dari 75% pada setiap jalur. Rugi-rugi aliran total masing-masing jalur masih berada dalam batas kapasitas pompa, namun dengan margin yang sempit. Diameter pipa 0,114 m menghasilkan laju aliran sekitar 0,79 m/s yang sesuai dengan standar industri untuk cairan korosif. Pemilihan material stainless steel Sch.80 terbukti efektif dalam menekan rugi gesekan.

Kata kunci: kerugian mayor, kerugian minor, rugi-rugi aliran.

1. LATAR BELAKANG

Ketika fluida nyata mengalir di dalam sistem perpipaan, sebagian energi mekanik nya hilang akibat interaksi kompleks antara fluida dan dinding pipa, serta akibat adanya komponen sambungan yang menyebabkan gangguan aliran. Energi yang hilang ini dikonversi menjadi energi termal melalui mekanisme friksi internal dan turbulensi, yang selanjutnya menimbulkan rugi-rugi aliran dalam arah aliran fluida (Haddad, 2019; Sudirman & Harves, 2022; Thorat et

al., 2025). Secara umum, rugi-rugi aliran dalam perpipaan diklasifikasikan menjadi dua kategori utama, yaitu kerugian mayor dan kerugian minor. Kerugian mayor dapat terjadi disebabkan oleh gesekan kontinu antara fluida dengan dinding pipa sepanjang jalur alirannya, sementara kerugian minor timbul akibat adanya persambungan seperti belokan (*elbow*), bentuk T (*tee*) serta bentuk katup (*valve*) (Darmulia et al., 2021; Gonzalez et al., 2024; Luthfi & Yulianto, 2023; Rahayu et al., 2021).

Dalam banyak aplikasi industri, terutama sistem yang mengalirkan fluida kimia dengan viskositas tinggi, seperti larutan natrium hidroksida (NaOH), kontribusi kerugian minor dapat melebihi kerugian mayor, terutama pada instalasi pipa pendek dengan banyak sambungan (Rumaherang et al., 2023). Oleh karena itu, evaluasi rugi aliran total menjadi krusial untuk menjamin efisiensi sistem dan keandalan operasional, khususnya pada *chlor alkali plant* yang menggunakan pompa sentrifugal untuk menyalurkan NaOH ke sel elektrolisis melalui jaringan pipa *stainless steel*. Perancangan dan analisis sistem perpipaan dalam konteks ini tidak hanya mencakup pemilihan material pipa dan ukuran diameter, tetapi juga mempertimbangkan konfigurasi jalur, jenis dan jumlah sambungan serta metode analitis yang digunakan untuk menghitung rugi-rugi aliran.

Meskipun beberapa pendekatan empiris seperti rumus Hazen-Williams banyak digunakan dalam praktik teknik, metode ini terbukti kurang akurat ketika diterapkan pada fluida selain air bersih seperti larutan kimia dengan sifat fisik yang berbeda (Jamil, 2019), karena tidak mampu mengakomodasi sifat non-Newtonian serta karakteristik fisiknya yang kompleks (Sunaris et al., 2019). Sebagai alternatif, metode Darcy-Weisbach banyak direkomendasikan karena mampu menangani secara lebih presisi karakteristik fluida kimia yang memiliki viskositas dan densitas berbeda dibandingkan air biasa (Rondón-Almeyda et al., 2021), terutama ketika faktor gesekan dihitung secara lebih akurat berdasarkan bilangan Reynold dan kekasaran relatif pipa (Sherza, 2024).

Fokus utama dari penelitian ini adalah menganalisis karakteristik rugi-rugi aliran baik kerugian mayor maupun kerugian minor pada Chlor Alkali Plant di PT X Porsea serta mengevaluasi keandalan desain pipa dan kelayakan hidroliknya berdasarkan distribusi rugi aliran serta kondisi aliran fluida. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis yang relevan untuk optimalisasi sistem transportasi cairan kimia di sektor proses kimia serta dapat memperkaya referensi praktis dalam bidang manajemen energi fluida industri, terutama untuk sistem perpipaan kimia non-air.

2. KAJIAN TEORITIS

Sistem Perpipaan dan Fluida Kimia

Sistem perpipaan dalam industri kimia memainkan peran vital sebagai media transportasi fluida dari satu unit proses ke unit lainnya. Dalam konteks Chlor Alkali Plant, salah satu fluida kritis yang dialirkan adalah larutan Natrium Hidroksida (NaOH) dengan konsentrasi 29–31%. Fluida ini bersifat korosif dan memiliki karakteristik reologi yang khas, seperti viskositas dan densitas yang tinggi dibandingkan air. Oleh karena itu, pemilihan material pipa serta perancangan sistem aliran perlu mempertimbangkan sifat agresif fluida terhadap komponen perpipaan.

Rugi-rugi Aliran (Head Loss) dalam Sistem Perpipaan

Rugi-rugi aliran adalah kehilangan tekanan energi dalam aliran fluida yang terjadi karena adanya gesekan dinding pipa (kerugian mayor) maupun akibat hambatan dari sambungan, katup, dan belokan (kerugian minor). Dalam perancangan sistem perpipaan, analisis rugi aliran penting untuk memastikan bahwa pompa mampu menyediakan tekanan yang cukup agar fluida mencapai tujuan akhirnya.

Kerugian Mayor dan Faktor Friksi

Kerugian mayor (*major losses*) timbul akibat gesekan antara fluida dengan dinding pipa sepanjang lintasan lurus. Besarnya kerugian ini dipengaruhi oleh panjang dan diameter pipa, kekasaran permukaan dalam pipa, kecepatan aliran, serta sifat fluida. Salah satu parameter penting dalam perhitungan kerugian mayor adalah faktor friksi, yang nilainya bergantung pada bilangan Reynolds dan kekasaran relatif pipa. Penentuan faktor friksi pada aliran turbulen dapat dilakukan menggunakan berbagai pendekatan, seperti diagram Moody, persamaan Swamee-Jain, atau persamaan Colebrook–White (Sorgun & Ulker, 2019).

Kerugian Minor dan Koefisien Kehilangan Energi

Kerugian minor (*minor losses*) mencakup kehilangan tekanan akibat gangguan aliran oleh persambungan (seperti *elbow*, *tee*, dan *valve*). Besarnya kerugian ini dinyatakan dengan koefisien kehilangan energi, yang merupakan angka empiris tergantung pada jenis dan geometri sambungan. Total kerugian minor dihitung sebagai hasil perkalian koefisien dengan energi kinetik aliran fluida. Dalam sistem yang kompleks dan padat seperti pabrik kimia, kerugian minor bisa menjadi signifikan, bahkan melebihi kerugian mayor.

Bilangan Reynolds dan Karakteristik Aliran

Bilangan Reynolds digunakan untuk mengklasifikasikan jenis aliran dalam pipa, apakah laminar, transisi, atau turbulen. Nilai ini dihitung berdasarkan densitas fluida, kecepatan aliran, diameter pipa, dan viskositas dinamik. Pada bilangan Reynolds tinggi (>4000), aliran disebut turbulen dan cenderung menyebabkan peningkatan kehilangan energi akibat terbentuknya vorteks dan arus eddy. Karakteristik turbulen ini umum terjadi dalam aliran industri, khususnya untuk fluida dengan kecepatan sedang hingga tinggi seperti NaOH.

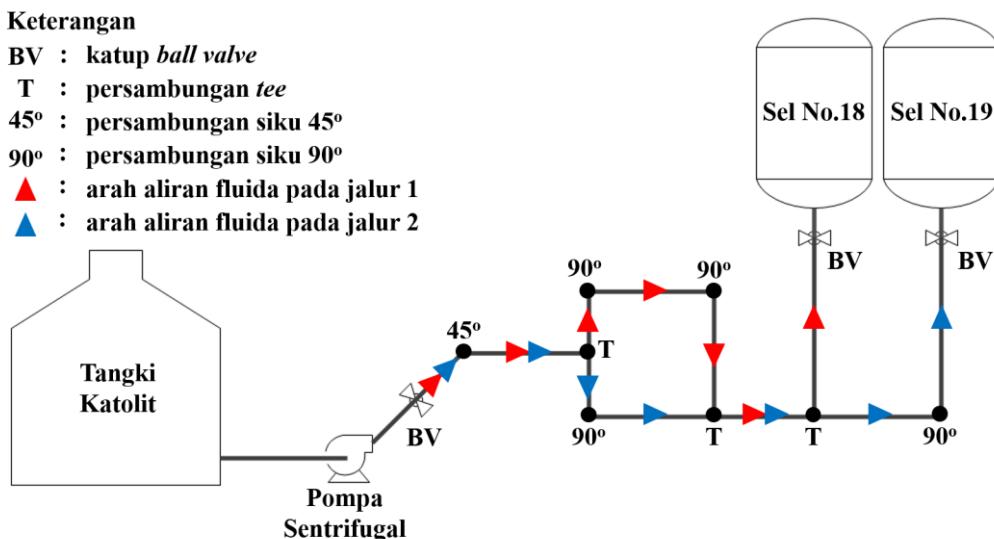
Peran Material Pipa dan Kekasaran Relatif

Material pipa sangat mempengaruhi besarnya kehilangan tekanan. Pipa *stainless steel* tipe Sch.80 dikenal memiliki ketahanan tinggi terhadap korosi dan permukaan dalam yang relatif halus, dengan kekasaran absolut rendah (sekitar 0,000007 ft). Kekasaran relatif, yaitu perbandingan antara kekasaran absolut dan diameter pipa, menjadi parameter penting dalam perhitungan faktor friksi pada aliran turbulen. Pemilihan pipa yang tepat sangat menentukan efisiensi sistem perpipaan secara keseluruhan.

3. METODE PENELITIAN

Keterangan

- BV : katup *ball valve*
- T : persambungan *tee*
- 45° : persambungan siku 45°
- 90° : persambungan siku 90°
- ▲ : arah aliran fluida pada jalur 1
- ▲ : arah aliran fluida pada jalur 2



Gambar 1. Geometri dan komponen sistem perpipaan

Penelitian ini dilakukan pada sistem perpipaan instalasi Chlor Alkali Plant di PT X Porsea, di mana pada instalasi tersebut fluida yang digunakan adalah larutan katolit NaOH berkonsentrasi 29–31% dan dialirkan dari sebuah tangki katolit menuju dua unit sel elektrolisis masing-masing Jalur 1 untuk Sel No.18 dan Jalur 2 untuk Sel No.19. Aliran fluida didorong

oleh pompa sentrifugal melalui jaringan pipa tipe industri Schedule 80 *stainless steel*. Geometri dan komponen sistem perpipaan secara rinci ditampilkan pada Gambar 1 sedangkan data teknis pipa, perpipaan, fluida dan pompa ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data teknis pipa, perpipaan, fluida dan pompa

Komponen Spesifikasi	Detail Spesifikasi
Pipa	Tipe dan bahan: sch.80, <i>stainless steel</i> Kekasaran absolut: 0,000007 ft Diameter dalam: 4,48 in
Persambungan pipa	Panjang pipa jalur 1: 6 m Panjang pipa jalur 2: 8,25 m Jumlah <i>ball valve</i> jalur 1: 2 buah Jumlah <i>ball valve</i> jalur 2: 2 buah Jumlah <i>tee</i> jalur 1: 3 buah Jumlah <i>tee</i> jalur 2: 3 buah Jumlah <i>elbow 45°</i> jalur 1: 1 buah Jumlah <i>elbow 45°</i> jalur 2: 1 buah Jumlah <i>elbow 90°</i> jalur 1: 3 buah Jumlah <i>elbow 90°</i> jalur 2: 4 buah
Fluida	Jenis: NaOH 29-31% Densitas: 1,29 g/cm ³ Viskositas: 1,72 cP
Pompa	Total head: 18 m

Adapun beberapa asumsi yang digunakan dalam penelitian ini adalah: 1) Aliran dianggap stabil dan kontinu selama proses transportasi dalam pipa serta kondisi pipa dalam keadaan bersih tanpa adanya endapan atau korosi yang signifikan; 2) Berdasarkan informasi yang diperoleh dari (Gerhart et al., 2020) dan (Crane, 2009), maka nilai kekasaran absolut pipa *stainless steel* Sch.80 ditetapkan sebesar 0,00000213 m sementara itu koefisien kerugian diambil berdasarkan konfigurasi persambungan yang digunakan, dengan asumsi operasi *steady-state* dan kondisi *fully open* dan 3) Pengaruh temperatur dianggap konstan dan tidak mempengaruhi perhitungan rugi-rugi aliran. Dengan asumsi-asumsi tersebut, perhitungan rugi-rugi aliran diharapkan dapat menggambarkan kondisi aktual di lapangan dengan tingkat akurasi yang dapat diterima, meskipun data tekanan antar ujung pipa serta pengukuran debit aktual belum tersedia.

Setelah menetapkan parameter dasar sistem seperti jenis fluida, karakteristik geometrik pipa, serta jumlah dan jenis sambungan, maka perhitungan teknis dilakukan untuk mengevaluasi profil aliran dan rugi-rugi aliran dalam sistem. Mengingat fluida yang digunakan adalah larutan NaOH 29–31% dengan viskositas dan densitas tertentu, serta sistem perpipaan terdiri dari pipa *stainless steel* Sch. 80 dengan diameter dalam tetap dan konfigurasi sambungan tetap, maka asumsi aliran tunak dan inkompresibel dapat diterapkan secara valid. Berdasarkan

hal ini, tahap awal perhitungan dimulai dari menentukan kecepatan aliran fluida di dalam pipa, yang selanjutnya menjadi dasar bagi estimasi bilangan Reynolds, jenis aliran, serta rugi-rugi aliran dalam sistem yaitu kerugian mayor dan kerugian minor.

Kecepatan aliran fluida di dalam pipa secara sederhana dihitung melalui:

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (1)$$

Di mana v adalah kecepatan aliran fluida dalam satuan m/s, Q adalah debit alir fluida dalam satuan m^3/s dan D adalah diameter dalam pipa dalam satuan m. Dengan menghitung kecepatan aliran fluida, maka besarnya kerugian mayor dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

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

Di mana h_f adalah kerugian mayor dalam satuan m, f adalah faktor gesekan (tanpa satuan), L adalah panjang pipa dalam satuan m, D adalah diameter dalam pipa dalam satuan m, v adalah kecepatan aliran fluida dalam satuan m/s dan g adalah percepatan gravitasi bumi (nilainya $9,8 \text{ m/s}^2$). Faktor gesekan dapat dicari dengan menggunakan diagram Moody, namun sebelumnya bilangan Reynold aliran fluida harus dihitung terlebih dahulu dengan:

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

Di mana Re adalah bilangan Reynold (tanpa satuan), ρ adalah densitas fluida dalam satuan kg/m^3 , v adalah kecepatan aliran fluida dalam satuan m/s, D adalah diameter dalam pipa dalam satuan m dan μ adalah viskositas dinamik fluida dalam satuan Pa.s.

Sementara itu, besarnya kerugian minor dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$h_m = \sum k \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

Di mana h_m adalah kerugian minor dalam satuan m, k adalah koefisien kehilangan energi yang ditentukan berdasarkan jenis dan jumlah persambungan yang digunakan pada sistem perpipaan (tanpa satuan), v adalah kecepatan aliran fluida dalam satuan m/s dan g adalah percepatan gravitasi bumi (nilainya $9,8 \text{ m/s}^2$). Nilai k diacu dari studi yang dilakukan oleh (Julianto et al., 2022) dan (Bettesda, 2024), yaitu masing-masing sebesar 0,05 untuk katup *ball valve*, 1 untuk persambungan *tee*, 0,4 untuk persambungan 45° dan 0,3 untuk persambungan 90° .

Selanjutnya, nilai rugi-rugi aliran total dapat dihitung sebagai berikut:

$$h_{total} = H + h_f + h_m \quad (5)$$

Di mana h_{total} adalah rugi-rugi aliran total dalam satuan m, h_f adalah kerugian mayor dalam satuan m dan h_m adalah kerugian minor dalam satuan m.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

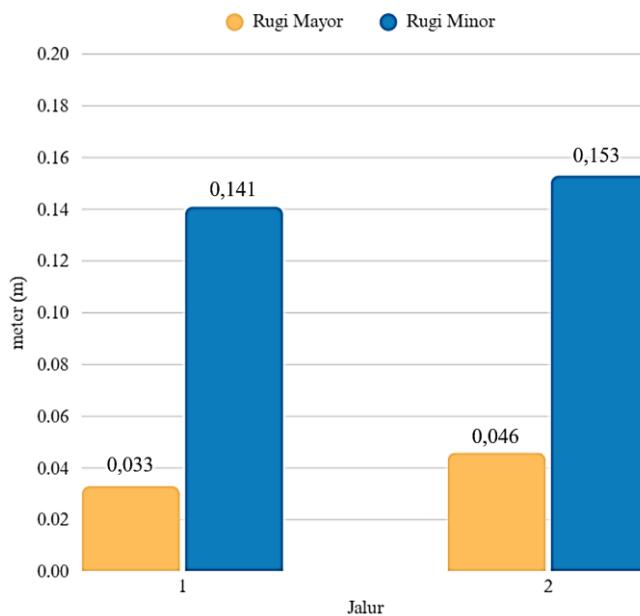
Tabel 2. Hasil perhitungan dan analisis

Parameter	Hasil Perhitungan
Laju aliran	0,79 m/s
Kekasaran relatif	0,0000187 m
Bilangan Reynold	67885
Faktor gesekan	0,0196
Rugi aliran total jalur 1	18,175 m
Rugi aliran total jalur 2	18,192 m

Dari Tabel 2 terlihat bahwa laju aliran fluida sebesar 0,79 m/s dan bilangan Reynolds sebesar 67.885, yang menandakan bahwa aliran berada dalam kondisi turbulen penuh. Dalam situasi seperti ini, penentuan faktor gesekan menjadi aspek krusial untuk mengestimasi rugi-rugi aliran secara akurat. Dengan kekasaran relatif sebesar 0,0000187, penggunaan diagram Moody secara numerik (https://www.advdelphisys.com/michael_maley/moody_chart/) menghasilkan nilai faktor friksi sebesar 0,0196 yang mana nilai ini telah divalidasi melalui pendekatan eksak berdasarkan karakteristik fisik pipa dan sifat reologi fluida, menjadikan pendekatan ini andal untuk kondisi operasional riil.

Dari sisi desain geometri, laju aliran yang dihasilkan menunjukkan kecukupan dari perspektif hidrodinamik maupun keamanan korosi (Xu et al., 2024). Laju aliran ini masih berada dalam rentang yang direkomendasikan (Kazem et al., 2024) untuk suatu fluida kimia agresif (0,6–1,2 m/s), yang mampu meminimalkan risiko erosi akibat kecepatan tinggi sekaligus menjaga tekanan balik dalam batas aman. Sementara itu, bilangan Reynolds yang tinggi, disertai nilai friksi rendah, menunjukkan bahwa desain pipa ini telah berada dalam kondisi optimal untuk efisiensi aliran.

Lebih lanjut, kekasaran relatif yang sangat rendah secara langsung berkontribusi pada rendahnya rugi-rugi aliran, terutama bila dibandingkan dengan sistem industri lain pada debit fluida serupa. Hal ini menunjukkan bahwa keputusan pemilihan material *stainless steel* Sch.80 sangat efektif dalam menekan gesekan—terutama dalam kondisi aliran turbulen seperti pada penelitian ini. Temuan tersebut selaras dengan praktik di sejumlah pabrik kimia yang dikaji oleh (Rahmad et al., 2024) yang menekankan pentingnya penggunaan *stainless steel* untuk aplikasi larutan katolit NaOH, mengingat ketahanan nya terhadap degradasi dan kontribusi nya yang minimal terhadap rugi aliran.



Gambar 2. Geometri dan komponen sistem perpipaan

Dari Tabel 2 terlihat bahwa rugi aliran total pada Jalur 1 sebesar 18,175 m sedangkan Jalur 2 mencapai 18,198 m. Walaupun selisih antar jalur sangat kecil ($< 0,13\%$), distribusi komponen kerugiannya menunjukkan pola yang konsisten dan signifikan. Sementara itu, dari Gambar 2 terlihat bahwa pada Jalur 1 kerugian mayor hanya berkontribusi sebesar 0,033 m (0,18%), sedangkan kerugian minor mencapai 0,141 m (0,78%). Pola yang serupa juga tampak pada Jalur 2, di mana kerugian mayor tercatat sebesar 0,046 m (0,25%) dan kerugian minor sebesar 0,153 m (0,84%). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi jalur serta jenis dan jumlah sambungan memiliki kontribusi dominan terhadap total kerugian dalam sistem ini.

Temuan ini menguatkan pernyataan dalam (Dahlan et al., 2024) bahwa kerugian minor sering kali mendominasi dalam tata letak industri yang ringkas atau padat”, meskipun pada penelitiannya tersebut belum disajikan analisis kuantitatif proporsi kerugian minor terhadap rugi-rugi aliran total. Di sisi lain, hasil ini juga mengisi kekosongan dalam penelitian yang dilakukan oleh (Yahya et al., 2022) dan (Alkindi et al., 2023), yang cenderung menekankan pada validasi sistem perpipaan melalui pengukuran tekanan hulu-hilir pompa, tetapi belum mengelaborasi segmentasi antara kerugian mayor dan minor secara mendalam. Studi ini, oleh karena itu, menyumbangkan nilai tambah melalui pendekatan kuantitatif terperinci dan presisi tinggi terhadap masing-masing elemen rugi-rugi aliran, memberikan kontribusi teoritis sekaligus praktis dalam optimalisasi sistem perpipaan untuk fluida kimia.

Rugi aliran total sebesar $\pm 18,2$ m masih berada dalam batas toleransi dari kapasitas pompa yang digunakan (yaitu total head pompa yang sebesar 18 m) sehingga sistem perpipaan masih beroperasi dalam rentang yang dapat dikatakan aman. Namun demikian, margin yang sangat sempit antara total rugi-rugi aliran aktual dan kapasitas head pompa tersebut ($<0,2$ m) mengindikasikan kerentanan terhadap variasi operasional, seperti perubahan viskositas akibat fluktuasi suhu atau konsentrasi fluida. Dalam konteks ini, penerapan sistem kontrol berbasis variabel kecepatan dapat menjadi solusi, sebagaimana disarankan oleh (Salmasi et al., 2022), untuk meningkatkan fleksibilitas dan ketahanan sistem terhadap kondisi tidak stabil.

Akhirnya, hasil penelitian ini juga memperkuat rekomendasi dalam (Dahlan et al., 2024) mengenai pemilihan pipa dengan kekasaran permukaan rendah untuk efisiensi jangka panjang. Namun berbeda dengan pendekatan umum dalam penelitian mereka tersebut, penelitian ini secara spesifik menyajikan pembuktian numerik terhadap korelasi antara kekasaran relatif, faktor gesekan dan distribusi rugi-rugi aliran. Dengan demikian, pendekatan yang diusung dalam penelitian ini dapat dijadikan rujukan praktis maupun teoretis dalam merancang sistem perpipaan untuk fluida kimia berbasis NaOH dengan kompleksitas persambungan tinggi.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis kuantitatif terhadap sistem perpipaan NaOH 29–31% di Chlor Alkali Plant PT X, Porsea, dapat disimpulkan bahwa mayoritas kerugian tekanan berasal dari komponen minor seperti *elbow*, *valve*, dan sambungan. Total rugi-rugi aliran pada Jalur 1 sebesar 18,175 m dan Jalur 2 sebesar 18,198 m, dengan kontribusi kerugian minor mencapai lebih dari 75% pada masing-masing jalur. Meskipun nilai total head loss masih berada dalam batas kemampuan pompa (18 m), margin yang sempit ($<0,2$ m) menunjukkan perlunya pertimbangan terhadap kemungkinan fluktuasi operasional. Diameter pipa 4,48 in (0,114 m) dinilai optimal karena menghasilkan laju aliran yang sesuai rekomendasi industri untuk fluida kimia agresif. Selain itu, pemilihan material stainless steel Sch.80 terbukti efektif dalam meminimalkan rugi gesekan. Temuan ini memperkuat pentingnya evaluasi desain sistem perpipaan berbasis data dan memberikan masukan berharga untuk optimalisasi sistem di fasilitas industri serupa.

DAFTAR REFERENSI

- Alkindi, H., Santosa, H., & Sutoyo, E. (2023). Analisis head losses pada circulating fluida air dalam dua jenis pipa. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 9(1), 51–56.
- Betesda, Y. C. (2024). *Perhitungan friction loss pada transportasi NaOH 29–31% dari outlet pump 056b menuju ke chlor alkali cell pada chemical plant di PT. Toba Pulp Lestari, Tbk.*
- Crane, C. (2009). *CRANE technical paper 410 metric (2009): Flow of fluids through valves, fittings and pipe*. <https://codehub.building.govt.nz/resources/crane-tp-410-2009>
- Dahlan, M., Duma, G. A., Azis, N., & Amaluddin, M. N. H. (2024). Analisis perbandingan kerugian aliran pada pipa jenis PVC dan galvanis dengan menggunakan elbow 90 derajat. *Majamecha*, 6(1), 149–158.
- Darmulia, Rahman, F., Ismail, & Burham, R. M. (2021). Analisis pengaruh perubahan katup pada pipa galvanis dan stainless terhadap kerugian head. *ILTEK: Jurnal Teknologi*, 16(2), 65–69.
- Gerhart, P. M., Hochstein, J. I., & Gerhart, A. L. (2020). *Munson, Young and Okiishi's fundamentals of fluid mechanics* (International adaptation).
- Gonzalez, J., Meana-Fernandez, A., Perez, I. V., & Oro, J. M. F. (2024). Minor loss coefficient for abrupt section changes in a cylindrical pipe using a numerical approach. *Fluids*, 152(9), 1–19.
- Haddad, A. (2019). Evaluation and correlation of friction head losses in smooth and rough pipes. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM)*, 357–362.
- Jamil, R. (2019). Frictional head loss relation between Hazen-Williams and Darcy-Weisbach equations for various water supply pipe materials. *International Journal of Water*, 13(4), 333–346.
- Julianto, E., Febriyan, Gunarto, & Sarwono, E. (2022). Analisis minor losses alat uji aliran fluida skala laboratorium. *Jurnal Dinamis*, 10(2), 7–19.
- Kazem, M. K., Hasan, B. O., Al-Zuraiji, S. M., & Znad, H. T. (2024). The effect of flow velocity on corrosion and corrosion mitigation of carbon steel in wide range of sulfuric acid concentration. *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences (NJES)*, 27(1), 91–96.
- Luthfi, M., & Yulianto, T. (2023). Rancang bangun prototipe fluid friction apparatus untuk menganalisis kehilangan energi (head loss) dengan variasi diameter pipa. *Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil (Proteksi)*, 5(1), 29–35.
- Rahayu, P., Putri, D. K., Rosalina, & Indriyani, N. (2021). Pengaruh diameter pipa pada aliran fluida terhadap nilai head loss. *Jurnal Agitasi*, 2(1), 23–32.

- Rahmad, N. A., Dewajani, H., & Falsafi, F. A. (2024). Perancangan pompa sentrifugal larutan NaOH 3% sebagai media pembersih wire dan press part pada industri kertas. *Distilat*, 10(1), 13–22.
- Rondón-Almeyda, C., Sierra-Serrano, L., & Rincón-Ortiz, M. (2021). Localised corrosion of super duplex stainless steel in synthetic NaOH-Na₂S solution at different temperatures. *Revista Facultad de Ingeniería*, 100, 113–123. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20210527>
- Rumaherang, E. J., Wattimena, W. M., Rawulun, S. M., & Noya, E. (2023). Studi regim aliran fluida dan penentuan head loss akibat gesekan pada instalasi perpipaan. *Seminar Nasional "Archipelago Engineering" 2023*, 154–161.
- Salmasi, F., Abraham, J., & Salmasi, A. (2022). Design considerations for pumping stations using variable speed pumps. In *Novel Perspectives of Engineering Research* (Vol. 10, pp. 99–118).
- Sherza, J. S. (2024). Theoretical investigation of the major and minor losses in pipes and fittings. *Babylonian Journal of Mechanical Engineering*, 12–18. <https://doi.org/10.58496/BJME/2024/003>
- Sorgun, M., & Ulker, E. (2019). Friction factor calculation for turbulent flow in annulus with temperature effects. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 30(7), 3755–3763.
- Sudirman, & Harves. (2022). Analisa headloss aliran fluida pada pipa lurus dengan variasi debit aliran dan variasi diameter pipa. *Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, 8(2), 165–173.
- Sunaris, M., Muljono, M., Telaumbanua, C., & Tallar, R. (2019). Analysis of energy losses in smooth pipes. *International Symposium on Sciences, Engineering, and Technology*, 1–6.
- Thorat, P., Patil, R., Patil, A., & Salunke, P. (2025). Flow resistance unveiled: Analyzing major losses in pipeline systems. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, 16(1), 46–66.
- Xu, T., ZhangRui, & Si, X. (2024). Effects of fluid dynamics parameters on flow-accelerated corrosion at elbow of carbon steel pipeline. *Material Research Express*, 11, 1–14.
- Yahya, A. K., Rahayu, P., Hasnah, U., & Maulana, A. Y. (2022). Analisa head loss dan kerja pompa dengan variasi perubahan diameter pada sistem pemipaan. *Majalah Ilmiah Teknologi Industri (SAINTI)*, 19(2), 51–57.