KOEFISIEN KEHILANGAN TEKANAN MINOR PADA BELOKAN 90°, PERBESARAN, DAN PENGECILAN PIPA: STUDI EKSPERIMENTAL PADA ALAT HI-1060

Marlaily Idris[1], Ardian Hanif,[2] Abdul Rahman[3]
[1,2] Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lancang Kuning
[3]Program Studi Mekatronika, Fakultas Teknik, Universitas Lancang Kuning
Jl. Yos Sudarso km. 8 Rumbai, Pekanbaru, Telp. (0761) 52324
Email: marlailyidris@unilak.ac.id, ardiehanif@gmail.com , Abdulrahman@unilak.ac.id

ABSTRAK

Kehilangan tinggi tekan minor pada sambungan pipa berpengaruh terhadap perancangan sistem perpipaan, namun nilai koefisien kehilangan (K) pada literatur umumnya diperoleh dari kondisi uji yang berbeda dengan peralatan laboratorium. Penelitian ini bertujuan menentukan nilai K eksperimental untuk tujuh *fitting* pada alat uji HI-1060 Jaringan Pipa Saluran Tertutup, yaitu 90° *mitre*, *standard* 90° *elbow*, belokan halus radius 40, 90, dan 140 mm, perbesaran mendadak (13,6 ke 26,2 mm), dan pengecilan mendadak (26,2 ke 13,6 mm). Debit diukur secara volumetrik pada dua variasi debit (Re ≈ 26.000 dan 22.800), dan kehilangan tinggi tekan dihitung dari bacaan piezometer hulu dan hilir menggunakan persamaan energi dengan koreksi titik nol. Nilai K belokan halus konsisten pada kedua debit dengan selisih 3–5% dan meningkat dari 0,30–0,31 menjadi 0,75–0,78 seiring bertambahnya rasio R/D dari 2,9 hingga 10,3, yang sejalan dengan bertambahnya gesekan sepanjang busur belokan. Nilai K 90° *mitre* (0,66 dan 0,56) berada pada orde besaran yang sama dengan nilai literatur 1,1. Sebaliknya, nilai K *standard elbow*, perbesaran mendadak, dan pengecilan mendadak tidak konsisten antar-debit atau bernilai negatif, yang mengindikasikan perlunya verifikasi bacaan piezometer pada *fitting* tersebut. Hasil pendahuluan ini menunjukkan perlunya penambahan variasi debit, volume tampungan yang lebih besar, replikasi, dan koreksi gesekan pipa lurus untuk memperoleh nilai K yang andal.

Kata Kunci: kehilangan tinggi tekan minor, koefisien kehilangan, belokan pipa, perbesaran mendadak, pengecilan mendadak

ABSTRACT

Minor head losses at pipe fittings affect the design of piping systems, yet the loss coefficients (K) reported in the literature are generally obtained under test conditions that differ from laboratory apparatus. This study aims to determine experimental K values for seven fittings on the HI-1060 Closed Conduit Pipe Network apparatus, namely a 90° mitre, a standard 90° elbow, smooth bends with radii of 40, 90, and 140 mm, a sudden enlargement (13.6 to 26.2 mm), and a sudden contraction (26.2 to 13.6 mm). Discharge was measured volumetrically at two flow rates (Re ≈ 26,000 and 22,800), and head losses were calculated from upstream and downstream piezometer readings using the energy equation with zero-flow correction. The K values of the smooth bends were consistent between the two flow rates, differing by 3–5%, and increased from 0.30–0.31 to 0.75–0.78 as the R/D ratio increased from 2.9 to 10.3, in line with the increasing friction along the bend arc. The K values of the 90° mitre (0.66 and 0.56) are of the same order of magnitude as the literature value of 1.1. In contrast, the K values of the standard elbow, sudden enlargement, and sudden contraction were inconsistent between flow rates or negative, indicating the need to verify the piezometer readings at these fittings. These preliminary results indicate the need for additional flow rates, a larger collecting volume, replications, and straight-pipe friction correction to obtain reliable K values.

Keywords: *minor head loss, loss coefficient, pipe bend, sudden enlargement, sudden contraction*

1. PENDAHULUAN

Aliran fluida di dalam pipa mengalami kehilangan energi akibat gesekan pada dinding pipa (kehilangan mayor) dan akibat perubahan geometri aliran pada sambungan, belokan, katup, serta perubahan penampang (kehilangan minor) [4]. Pada sistem perpipaan yang memiliki banyak *fitting* dan segmen pipa yang pendek, kehilangan minor dapat memberikan kontribusi yang berarti terhadap total kehilangan energi, sehingga perlu diperhitungkan dalam penentuan kebutuhan tinggi tekan pompa [1].

Kehilangan minor umumnya dinyatakan dengan koefisien kehilangan K, yaitu perbandingan antara kehilangan tinggi tekan dan tinggi kecepatan aliran [4]. Nilai K untuk berbagai jenis *fitting* telah ditabulasikan dalam buku acuan mekanika fluida [1], [5], dan kompilasi yang lebih rinci disusun oleh Idelchik [2]. Namun, nilai K tidak bersifat konstan, melainkan dipengaruhi oleh

p-ISSN : 1858-4217, e-ISSN : 2622-710X, DOI : https://doi.org/10.31849/2pkmfs59

bilangan Reynolds, kekasaran permukaan, dan detail geometri sambungan [2]. Pada belokan 90°, kehilangan tekanan dipengaruhi oleh rasio radius belokan terhadap diameter pipa (R/D) dan bilangan Reynolds, dan kehilangan total tidak selalu menurun dengan bertambahnya R/D [2], [3]. Oleh karena itu, nilai tabel tidak selalu mewakili *fitting* yang terpasang pada peralatan laboratorium.

Alat uji HI-1060 Jaringan Pipa Saluran Tertutup digunakan dalam praktikum hidrolika untuk mempelajari kehilangan energi pada pipa dan *fitting*. Nilai K eksperimental dari alat ini diperlukan sebagai acuan praktikum sekaligus untuk menilai kesesuaiannya dengan nilai literatur. Penelitian ini bertujuan untuk (i) menentukan nilai K eksperimental tujuh *fitting* pada alat HI-1060, (ii) membandingkannya dengan nilai literatur, dan (iii) mengkaji pengaruh rasio R/D terhadap nilai K pada belokan halus 90°. Artikel ini menyajikan hasil pengujian pendahuluan pada dua variasi debit beserta evaluasi terhadap prosedur pengukuran.

2. METODE PENELITIAN

Alat Uji

Pengujian dilakukan di Laboratorium Hidrolika menggunakan alat HI-1060 Jaringan Pipa Saluran Tertutup. *Fitting* yang diuji terdiri atas tujuh jenis, yaitu 90° *mitre*, *standard* 90° *elbow*, belokan halus 90° dengan radius 40 mm, 90 mm, dan 140 mm, perbesaran mendadak dari diameter 13,6 mm ke 26,2 mm, dan pengecilan mendadak dari diameter 26,2 mm ke 13,6 mm. Dengan diameter pipa 13,6 mm, rasio R/D ketiga belokan halus berturut-turut adalah 2,9; 6,6; dan 10,3. Setiap segmen uji memiliki panjang 914,5 mm dan dilengkapi piezometer di sisi hulu dan hilir *fitting*.

Prosedur Pengujian

Sebelum aliran dijalankan, bacaan seluruh piezometer dicatat pada kondisi tanpa aliran sebagai bacaan titik nol. Aliran kemudian dijalankan dan debit diatur pada dua variasi. Debit diukur secara volumetrik dengan mencatat waktu yang diperlukan untuk menampung air sebanyak 1 liter. Setelah aliran stabil, bacaan piezometer hulu dan hilir setiap *fitting* dicatat. Pada belokan radius 40 mm, bacaan hilir selalu lebih tinggi dari bacaan hulu pada kedua pengujian, yang mengindikasikan selang piezometer 13 dan 14 terpasang tertukar, sehingga urutan kedua bacaan tersebut dibalik dalam analisis.

Analisis Data

Debit aliran dan kecepatan rata-rata pada pipa dihitung dengan persamaan berikut [4]:

$$Q = \frac{\mathrm{Vol}}{t} \tag{1}$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2} \tag{2}$$

Jenis aliran ditentukan dengan bilangan Reynolds:

$$\mathrm{Re} = \frac{VD}{\nu} \tag{3}$$

Kehilangan tinggi tekan minor dihitung dari persamaan energi antara titik hulu (1) dan hilir (2) *fitting* [4]:

$$h_m = (h_1 - h_2) + \frac{{V_1}^2 - {V_2}^2}{2g} \tag{4}$$

Selisih bacaan piezometer ($h_1 - h_2$) terlebih dahulu dikoreksi terhadap selisih bacaan pada kondisi tanpa aliran (koreksi titik nol). Pada *fitting* berdiameter sama, suku kecepatan bernilai nol. Koefisien kehilangan dihitung dengan:

$$K = \frac{h_m}{V^2/2g} \tag{5}$$

dengan V adalah kecepatan pada pipa berdiameter 13,6 mm. Nilai literatur untuk perbesaran (K_P) dan pengecilan mendadak (K_K) dihitung dengan [5]:

$$K_P = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2 \tag{6}$$

$$K_K \approx 0{,}42\left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) \tag{7}$$

Keterangan:
Q = debit aliran (m³/s)
Vol = volume tampungan (m³)
t = waktu tampung (s)
V = kecepatan rata-rata aliran (m/s)
A = luas penampang pipa (m²)
D = diameter pipa (m)
ν = viskositas kinematik air, $1{,}0 \times 10^{-6}$ m²/s
h_m = kehilangan tinggi tekan minor (m)
h_1, h_2 = bacaan piezometer hulu dan hilir (m)
g = percepatan gravitasi, 9,81 m/s²
d, D = diameter pipa kecil dan pipa besar (m)

Nilai K pada artikel ini belum dikoreksi terhadap kehilangan gesekan pipa lurus di sepanjang segmen uji, karena data bacaan pipa lurus masih dalam tahap verifikasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Pengukuran

Data debit, kecepatan aliran, dan bilangan Reynolds untuk kedua variasi debit disajikan pada Tabel 1. Kedua debit menghasilkan aliran turbulen dengan bilangan Reynolds sekitar 26.000 dan 22.800.

Tabel 1. Data debit dan kecepatan aliran

Parameter	Debit 1	Debit 2
Volume tampungan (liter)	1	1
Waktu tampung (detik)	3,60	4,10
Debit, Q (m³/s)	$2{,}78 \times 10^{-4}$	$2{,}44 \times 10^{-4}$
V pipa 13,6 mm (m/s)	1,91	1,68
V pipa 26,2 mm (m/s)	0,52	0,45
$V^2/2g$ pipa 13,6 mm (mm)	186,4	143,7
Bilangan Reynolds, Re	26.006	22.834

Bacaan piezometer pada kondisi tanpa aliran dan pada kedua variasi debit ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Bacaan piezometer hulu/hilir (mm)

Fitting	No. piezo	Tanpa aliran	Debit 1	Debit 2
90° *mitre*	3 / 4	320 / 320	475 / 352	435 / 355
Standard 90° *elbow*	5 / 6	245 / 195	365 / 200	305 / 235
Perbesaran mendadak	9 / 10	125 / 130	230 / 248	240 / 200
Pengecilan mendadak	11 / 12	90 / 95	192 / 130	150 / 120
Belokan R 40 mm	14 / 13	135 / 135	230 / 175	215 / 170
Belokan R 90 mm	17 / 18	140 / 140	270 / 145	240 / 140
Belokan R 140 mm	15 / 16	135 / 135	260 / 120	240 / 128

Urutan piezometer 13 dan 14 dibalik karena selang terindikasi terpasang tertukar.

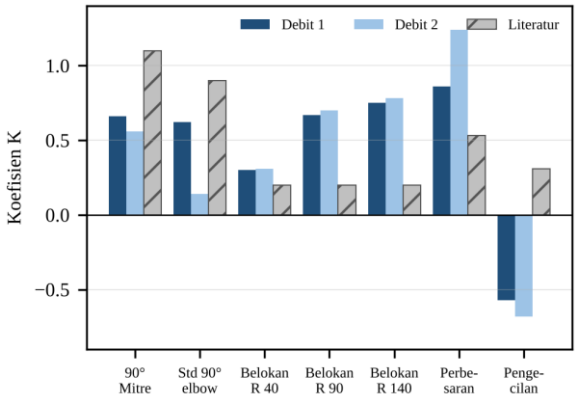
Koefisien Kehilangan Minor

Hasil perhitungan kehilangan tinggi tekan minor dan koefisien K menggunakan Persamaan (4) dan (5) disajikan pada Tabel 3, sedangkan perbandingannya dengan nilai literatur ditunjukkan pada Gambar 1.

Tabel 3. Kehilangan tinggi tekan minor dan koefisien K

Fitting	h_m D1 (mm)	K D1	h_m D2 (mm)	K D2	K lit.
90° *mitre*	123,0	0,66	80,0	0,56	1,1 [1]
Std. 90° *elbow*	115,0	0,62	20,0	0,14	0,9 [1]
Belokan R 40 mm (R/D = 2,9)	55,0	0,30	45,0	0,31	0,2 [1]
Belokan R 90 mm (R/D = 6,6)	125,0	0,67	100,0	0,70	0,2 [1]
Belokan R 140 mm (R/D = 10,3)	140,0	0,75	112,0	0,78	0,2 [1]
Perbesaran mendadak	159,8	0,86	178,3	1,24	0,53 [5]
Pengecilan mendadak	−105,8	−0,57	−98,3	−0,68	0,31 [5]

D1 = Debit 1; D2 = Debit 2. Nilai literatur perbesaran dan pengecilan dihitung dengan Persamaan (6) dan (7) untuk d/D = 13,6/26,2.

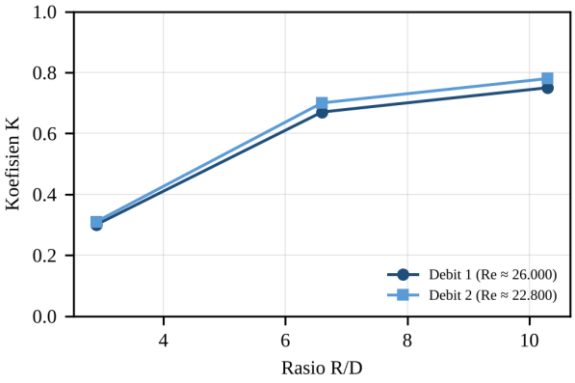


Gambar 1. Perbandingan nilai K eksperimental dan nilai literatur

Pada Debit 1 (Re ≈ 26.000) dan Debit 2 (Re ≈ 22.800), nilai K untuk 90° *mitre* (0,66 dan 0,56) berada pada orde besaran yang sama dengan nilai literatur 1,1 [1], dengan selisih −40% dan −49%. Nilai K *standard* 90° *elbow* pada Debit 1 (0,62) juga mendekati nilai literatur 0,9 [1] dengan selisih −31%, tetapi nilai pada Debit 2 (0,14) jauh lebih kecil. Nilai K perbesaran mendadak (0,86 dan 1,24) lebih besar dari nilai teoritis 0,53 [5], yang dapat disebabkan oleh pemulihan tekanan di hilir perbesaran yang belum sempurna pada titik ukur piezometer [2]. Secara umum, perbedaan nilai K terhadap literatur dapat dipahami karena nilai K tidak konstan, melainkan dipengaruhi oleh bilangan Reynolds, kekasaran permukaan, dan detail geometri sambungan *fitting* [2].

Pengaruh Rasio R/D pada Belokan Halus

Pada tiga belokan halus, nilai K meningkat seiring bertambahnya R/D, yaitu 0,30; 0,67; dan 0,75 pada Debit 1 serta 0,31; 0,70; dan 0,78 pada Debit 2 untuk R/D = 2,9; 6,6; dan 10,3, seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Literatur menunjukkan bahwa kehilangan tekanan pada belokan 90° dipengaruhi oleh rasio R/D dan bilangan Reynolds, dan kehilangan total tidak selalu menurun dengan bertambahnya R/D [2], [3]. Nilai literatur 0,2 [1] mewakili kehilangan akibat perubahan arah aliran, sedangkan nilai K terukur juga memuat gesekan dinding sepanjang busur yang panjangnya πR/2 dan bertambah sebanding dengan R/D [2], [3]. Dengan faktor gesekan Blasius $f = 0{,}316\,Re^{-0{,}25}$ [4], yaitu 0,025 pada Debit 1, koefisien gesekan busur $K_f = f(\pi/2)(R/D)$ bernilai 0,11; 0,26; dan 0,40, sehingga estimasi K total menjadi 0,31; 0,46; dan 0,60. Estimasi tersebut sesuai dengan hasil terukur pada R/D = 2,9 dan lebih kecil 24–46% pada R/D yang lebih besar. Sisa selisih tersebut konsisten dengan belum dikoreksinya gesekan pipa lurus di antara titik piezometer dan belokan, sehingga pola ini perlu dikonfirmasi setelah koreksi gesekan diterapkan dan variasi debit ditambah.



Gambar 2. Hubungan koefisien K dengan rasio R/D pada belokan halus 90°

Evaluasi Konsistensi Data

Kedua debit menghasilkan nilai K yang konsisten untuk belokan halus, dengan selisih antar-debit hanya 3–5%, dan untuk 90° *mitre* dengan selisih 15%. Konsistensi ini sesuai dengan sifat aliran turbulen, yaitu nilai K hampir tidak bergantung pada debit [4]. Rasio tinggi kecepatan antara kedua debit adalah 1,30, sedangkan rasio h_m terukur pada belokan halus dan *mitre* adalah 1,22–1,54, sehingga perubahan kehilangan tinggi tekan sebanding dengan V^2 [4]. Hal ini menunjukkan bahwa pengukuran debit pada kedua variasi konsisten satu sama lain. Meskipun demikian, volume tampungan 1 liter menghasilkan waktu tampung yang singkat (3,6–4,1 detik), sehingga kesalahan pencatatan waktu sebesar 0,3 detik menimbulkan ketidakpastian debit sekitar 7–8% dan ketidakpastian K sekitar 15–17%. Selisih K belokan halus antar-debit (0,01–

0,03) masih berada di dalam rentang ketidakpastian tersebut.

Sebaliknya, nilai K *standard elbow* berbeda jauh antar-debit (0,62 dan 0,14), dan nilai K pengecilan mendadak bernilai negatif pada kedua debit (−0,57 dan −0,68), yang tidak mungkin terjadi secara fisik. Karena anomali tersebut muncul pada kedua debit, sumbernya kemungkinan bukan pengukuran debit, melainkan pembacaan piezometer, koreksi titik nol, atau posisi titik ukur pada *fitting* tersebut. Pada *standard elbow*, koreksi titik nol mencapai 50 mm, lebih besar dari h_m Debit 2 (20 mm), sehingga kesalahan kecil pada bacaan titik nol sangat memengaruhi nilai K. Secara keseluruhan, kedua debit memberikan nilai K yang konsisten dan berada pada orde besaran yang sesuai dengan literatur untuk belokan halus dan 90° *mitre*, sedangkan nilai K *standard elbow*, perbesaran, dan pengecilan mendadak belum dapat digunakan sebagai hasil akhir.

4. KESIMPULAN

Pengujian pendahuluan pada alat HI-1060 pada dua variasi debit (Re ≈ 26.000 dan 22.800) menunjukkan bahwa nilai K belokan halus 90° konsisten antar-debit dengan selisih 3–5% dan meningkat dari 0,30–0,31 menjadi 0,75–0,78 seiring bertambahnya rasio R/D dari 2,9 hingga 10,3, yang sejalan dengan bertambahnya gesekan sepanjang busur belokan. Nilai K 90° *mitre* (0,66 dan 0,56) berada pada orde besaran yang sama dengan nilai literatur. Nilai K *standard* 90° *elbow*, perbesaran mendadak, dan pengecilan mendadak belum konsisten atau bernilai negatif, sehingga bacaan piezometer pada *fitting* tersebut perlu diverifikasi. Perubahan kehilangan tinggi tekan yang sebanding dengan V^2 menunjukkan bahwa pengukuran debit konsisten antar-variasi, namun volume tampungan 1 liter masih menimbulkan ketidakpastian K sekitar 15–17%.

Penelitian lanjutan disarankan menggunakan minimal lima variasi debit dengan rentang yang lebih lebar, volume tampungan minimal 5 liter dan tiga kali pencatatan waktu pada setiap debit, dengan tiga kali replikasi untuk setiap kondisi. Urutan selang piezometer perlu diperiksa sesuai arah aliran dan gelembung udara pada selang perlu dibuang sebelum pengujian. Bacaan titik nol dan bacaan pipa lurus perlu dicatat pada setiap debit agar koreksi gesekan dapat diterapkan, sehingga dapat disusun grafik hubungan Q–h_m, Q–K, dan K–R/D serta dilakukan evaluasi terhadap literatur menggunakan persentase kesalahan dan RMSE.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] Cengel Y.A. dan Cimbala J.M., 2014, *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, 3rd Ed., McGraw-Hill, New York.

[2] Idelchik I.E., 2007, *Handbook of Hydraulic Resistance*, 4th Ed., Begell House, New York.

[3] Ito H., 1960, Pressure Losses in Smooth Pipe Bends, *Journal of Basic Engineering*, Vol. 82, No. 1, hlm. 131–140.

[4] Munson B.R., Okiishi T.H., Huebsch W.W. dan Rothmayer A.P., 2013, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 7th Ed., John Wiley & Sons, Hoboken.

[5] White F.M., 2011, *Fluid Mechanics*, 7th Ed., McGraw-Hill, New York.