

## Perhitungan Ketinggian Tambahan Optimal Pada Sistem Filtrasi Pasir Dua Tabung Terbuka Seri

Petrus Setya Murdapa<sup>1</sup>, Leo Eladisa Ganjari<sup>2</sup>, Chatarina Dian Indrawati<sup>3</sup>,  
Theresia Liris Windyaningrum<sup>4\*</sup>

<sup>1,3,4</sup>Prodi Rekayasa Industri Fakultas Teknik Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

<sup>2</sup>Prodi Biologi Fakultas Teknologi Pangan Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

Email Corespondent\* : [theresialiris@ukwms.ac.id](mailto:theresialiris@ukwms.ac.id)

### Abstract

*This study proposes a calculation method to determine the minimum additional height required in a dual open-tube sand filtration system arranged in series. The model was developed by integrating the Ergun equation and the Darcy–Weisbach approach to calculate the pressure drop as water flows through the sand medium. The hydrostatic pressure in each tube was then linked to the calculated pressure drop to determine the necessary height increase to ensure smooth flow without overflow. The results showed that the minimum additional heights required were approximately 12.1 cm for the first tube and 11.2 cm for the second, which were rounded to 13 cm for field implementation. Physical testing confirmed that the flow proceeded smoothly without overflow, demonstrating the reliability of this method for designing dual open-tube sand filtration systems. These findings provide a critical numerical basis for the design of gravity-driven passive filtration systems.*

**Keywords:** Additional heigh, Filtration system, Pressure drop, Sand media, Water treatment

### Abstrak

*Kajian ini mengusulkan metode perhitungan untuk menentukan ketinggian tambahan minimal pada sistem filtrasi pasir dua tabung terbuka yang disusun seri. Model dikembangkan dengan mengintegrasikan persamaan Ergun dan pendekatan Darcy–Weisbach untuk menghitung penurunan tekanan saat aliran air melewati media pasir. Tekanan hidrostatik pada masing-masing tabung kemudian dikaitkan dengan hasil perhitungan tersebut guna menetapkan kenaikan ketinggian yang diperlukan agar aliran tetap lancar tanpa menimbulkan luapan. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tambahan ketinggian minimal yang dibutuhkan adalah sekitar 12,1 cm untuk tabung pertama dan 11,2 cm untuk tabung kedua, yang kemudian dibulatkan menjadi 13 cm untuk implementasi di lapangan. Pengujian fisik menunjukkan bahwa aliran berlangsung lancar tanpa luapan, menegaskan keandalan metode ini dalam perancangan sistem filtrasi pasir dua tabung terbuka. Temuan ini memberikan dasar numerik penting dalam desain sistem filtrasi pasif berbasis gravitasi.*

**Kata Kunci:** Ketinggian tambahan, Media pasir, Pengolahan air, Pressure drop, Sistem filtrasi

### PENDAHULUAN

Ketersediaan air bersih adalah kebutuhan pokok bagi masyarakat. Tidak terkecuali adalah masyarakat di salah satu sisi pegunungan Wilis, di Kabupaten Madiun. Filtrasi pasir telah terbukti efektif menghilangkan partikel kasar dan sejumlah kontaminan. Sistem filtrasi konvensional

umumnya hanya menggunakan satu tabung, namun pengaturan dua tabung secara seri dapat meningkatkan efisiensi dan kualitas air. Tabung pertama menangkap partikel kasar, sedangkan tabung kedua menghilangkan partikel halus yang tersisa. Air masuk ke tabung pertama secara gravitasi memanfaatkan posisi elevasi sumber air yang

lebih tinggi. Untuk mendukung itu bagian atas kedua tabung dibuat terbuka. Hal ini akan memudahkan perawatan dan pembersihan (American Water Works Association, 2011). Namun, muncul permasalahan yaitu air meluap di sisi atas tabung. Solusi yang dilakukan adalah menambah tinggi tabung secukupnya hingga air tidak meluap. Untuk menentukan berapa tambahan tinggi tersebut dibutuhkan metode penghitungannya.

Paper ini mengungkap metode perhitungan yang dimaksudkan itu dengan memanfaatkan konsep-konsep yang membahas mekanisme aliran dalam media berpori dan perhitungan pressure drop.

Hasil perhitungan diterapkan pada pembuatan sistem filtrasi yang dibangun secara fisik di lokasi. Terbukti bahwa metode perhitungan dapat diaplikasikan secara praktis sehingga dapat menjadi pedoman desain yang aman terkait tinggi tabung yang diperlukan.

## METODE

Gambar 1 menunjukkan sketsa konstruksi sistem filtrasi yang diterapkan. Seperti terlihat, sistem filtrasi bersifat pasif berbasis gravitasi yang terdiri dari dua buah drum (tabung) terbuka yang disusun secara seri. Air dari sumber masuk ke drum pertama melalui saluran di bagian bawah dan mengalir ke atas melewati bahan isian atau media filter, kemudian keluar melalui pintu outlet di sisi atas drum.

Selanjutnya, air yang telah difiltrasi dari drum pertama mengalir ke drum kedua melalui saluran penghubung. Di drum kedua, air kembali melewati media isian/filter dan keluar melalui outlet menuju tandon penampung akhir. Kedua drum memiliki

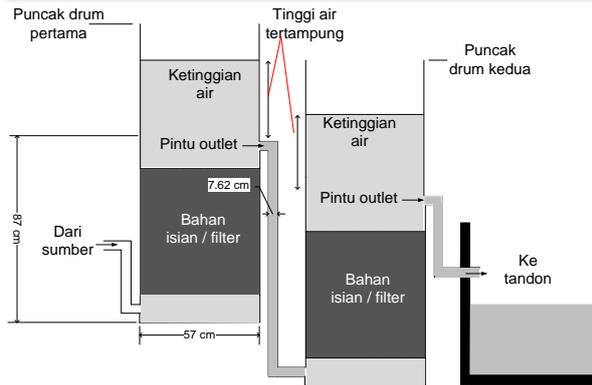
desain serupa, dengan ketinggian total drum pertama ditunjukkan sebesar 87 cm dan lebar dasar 57 cm.

Penting untuk diperhatikan adalah ketinggian air yang tertampung di atas masing-masing media filter. Ketinggian ini harus cukup untuk menghasilkan tekanan hidrostatik yang mengimbangi pressure drop akibat aliran air melalui media filter, agar tidak terjadi luapan dan aliran tetap lancar. Oleh karena itu, tinggi tambahan pada masing-masing drum—di atas permukaan media isian hingga outlet—menjadi elemen desain krusial.

Persamaan Bernoulli telah menghubungkan perubahan elevasi, kecepatan, dan tekanan fluida dalam pipa (Bear, 1972). Untuk aliran melalui media pasir, Ergun (1952) berhasil menggabungkan efek gesekan viskos dan inersia pada porous media. Ruya et al (2018) menerapkannya pada penggunaan zeolit alami dan Erdim et al (2015) memberikan koreksi untuk media yang bentuk butirannya tidak sferis. Yang dibutuhkan kemudian ialah penghitungan pressure drop yang terjadi pada aliran melalui partikel media pori (Çengel & Cimbala, 2006; Esence et al., 2017). Jika pressure drop terhitung dikaitkan dengan tekanan hidrostatik dari air yang harus tertampung dibagian atas tabung maka ketinggian tambahan minimal untuk mencegah luapan dapat dihitung.

Maka, langkah-langkah perhitungan tambahan ketinggian tabung dilakukan sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi parameter sistem, yang disusun dalam Tabel 1.

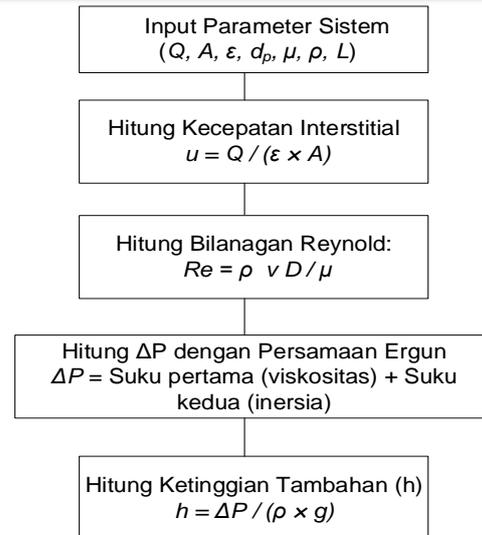


Gambar 1. Sketsa prinsip dari sistem filtrasi dua tabung terbuka seri

Tabel 1. Daftar Parameter Sistem

No	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
1	Diameter tabung	$D$	57	cm
2	Luas penampang tabung	$A$	0,255	$m^2$
3	Porositas tabung pertama	$\varepsilon_1$	0,40	-
4	Porositas tabung kedua	$\varepsilon_2$	0,35	-
5	Debit aliran masuk ke sistem (inlet pertama)	$Q$	5	L/min (= $8,33 \times 10^{-5} m^3/s$ )
6	Diameter rata-rata partikel pasir	$d_p$	0,5	mm (= $5 \times 10^{-4} m$ )
7	Viskositas fluida (air)	$\mu$	0,001	Pa·s
8	Densitas fluida (air)	$\rho$	1000	$kg/m^3$
9	Gravitasi	$g$	9,81	$m/s^2$
10	Tinggi media pasir	$L$	0,50	m

2. Metode perhitungan, ditampilkan dalam diagram alur pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alur tahapan perhitungan.

3. Implementasi perhitungan:

- a. Perhitungan Luas Penampang dan Kecepatan Aliran  
 Luas penampang tabung dihitung dengan:

$$A = \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2$$

dengan  $d = 0,6m$  diperoleh:  $A \approx 0.2827m^2$ .

Dengan debit aliran  $Q = 5 L/menit (\approx 8,33 \times 10^{-5} m^3/s)$ , dihitung kecepatan aliran:

$$V = \frac{Q}{A} \approx \frac{8,33 \times 10^{-5}}{0,2827} \approx 0,000295 m/s$$

- b. Penghitungan Bilangan Reynolds: Untuk menentukan sifat aliran, hitung Bilangan Reynolds:

$$Re = \frac{\rho V d_p}{\mu}$$

dengan  $\rho = 1000 kg/m^3$ ,  $d_p = 0,0005 m$ , dan  $\mu = 0,001 Pa \cdot s$ , diperoleh:

$$Re \approx \frac{1000 \times 0.000295 \times 0.0005}{0.001} \approx 0.1475$$

Karena  $Re \ll 10$ , aliran dikategorikan laminar, sehingga suku pertama dalam Persamaan Ergun yang dominan.

c. Perhitungan Pressure Drop:

Pressure drop dapat diperkirakan menggunakan Persamaan Ergun:

$$\Delta P = \frac{150\mu(1 - \epsilon)V}{\epsilon^3 d_p^2} + \frac{1.75\rho(1 - \epsilon)V^2}{\epsilon^3 d_p}$$

Untuk tabung pertama dengan  $\epsilon = 0,40$ , di mana  $d_p = 0,0005$  m, maka  $\Delta P$ :

$$\Delta P = \frac{150(0,001)(1 - 0,40)(0,000295)}{(0,40)^3(0,0005)^2} + \frac{1.75(1000)(1 - 0,40)(0,000295)^2}{(0,40)^3(0,0005)}$$

$$\Delta P \approx 1187 + 2,85 \approx 1189.85 \text{ Pa}$$

Total pressure drop:

$$\Delta P \approx 1187 + 2,85 \approx 1189.85 \text{ Pa}$$

d. Perhitungan Ketinggian Tambahan:

Ketinggian tambahan  $h$  dihitung dengan menghubungkan pressure drop dengan tekanan hidrostatik:

$$h = \frac{\Delta P}{\rho g}$$

dengan  $\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup> dan  $g = 9.81$  m/s<sup>2</sup>, maka:

$$h \approx \frac{1189.85}{1000 \times 9.81} \approx 0.1212 \text{ m} \approx 12.1 \text{ cm}$$

Cara yang sama dilakukan perhitungan untuk tabung kedua. Dengan nilai porositas  $\epsilon = 0.35$ , perhitungan menghasilkan  $h \approx 11.2$  cm.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1 dan Tabel 2 di bawah ini merangkum hasil perhitungan untuk masing-masing tabung.

Tabel 1. Hasil Perhitungan untuk Tabung Pertama

Ketinggian Tambahan (cm)	Selisih Tekanan (cm air)	Kondisi Luapan
12,1	12,1	Ya
13,0	0,9	Tidak
15,0	2,9	Tidak

Tabel 1 merepresentasikan hasil perhitungan untuk tabung pertama. Nilai 12,1 cm menunjukkan batas minimal di mana tekanan hidrostatik yang dihasilkan sama dengan penurunan tekanan akibat aliran melalui media pasir. Nilai ini merupakan batas kritis. Dengan menaikkan ketinggian tambahan menjadi 13,0 cm, selisih tekanan berkurang menjadi 0,9 cm, yang berarti sistem telah memiliki cadangan tekanan untuk mengantisipasi fluktuasi. Pada ketinggian 15,0 cm, selisih tekanan meningkat menjadi 2,9 cm, memberikan margin keamanan yang lebih besar.

Tabel 2. Hasil Perhitungan untuk Tabung Kedua

Ketinggian Tambahan (cm)	Selisih Tekanan (cm air)	Kondisi Luapan
11,2	11,2	Ya
13,0	1,8	Tidak
15,0	3,8	Tidak

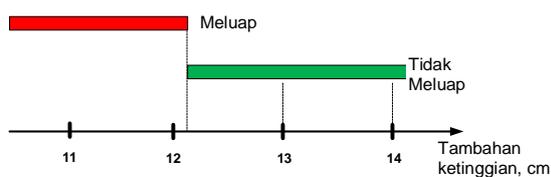
Tabel 2 adalah hasil perhitungan untuk tabung kedua. Nilai 11,2 cm merupakan batas minimal untuk tabung kedua di mana tekanan hidrostatik sama dengan tekanan drop, sehingga air mulai meluap. Karena porositas media di tabung kedua lebih rendah (35%), tekanan drop sedikit berbeda sehingga ketinggian minimal yang diperlukan sedikit lebih rendah dibandingkan tabung pertama.

Sama seperti padatabung pertama, peningkatan ketinggian tambahan lebih lanjut menjadi 13,0 cm atau 15,0 cm akan memberikan margin keamanan yang lebih besar lagi. Kali ini, selisih tekanan masing-masing 1,8 cm dan 3,8 cm akan membantu mengantisipasi kondisi operasi yang tidak stabil atau fluktuasi debit.

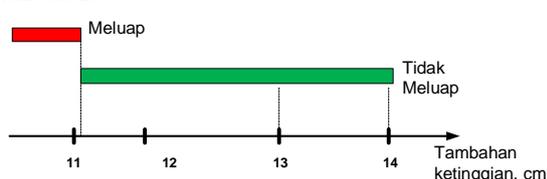
Nilai minimal ketinggian tambahan sedikit berbeda antara tabung pertama dan kedua karena perbedaan porositas media. Karena porositas media filtrasi pada tabung kedua sengaja dibuat lebih tinggi daripada porositas pada tabung pertama maka tambahan ketinggian minimum pada tabung kedua terhitung lebih tinggi. Ini sejalan dengan yang dinyatakan oleh Masters & Ela (2008) ataupun penjelasan yang diberikan dalam Weiner & Matthews (2013) dan Kutz (2013) bahwa semakin poros media filtrasi, akan semakin kecil tambahan ketinggian yang dibutuhkan.

Grafik hubungan antara kondisi luapan terhadap ketinggian tambahan dapat divisualisasikan pada Gambar 3.

TABUNG-1:



TABUNG-2:



Gambar 3. Grafik hubungan antara kondisi air di sisi atas kedua tabung terhadap tambahan ketinggian

Untuk implementasi riil di lokasi, diambil pembulatan nilai ketinggian tambahan tersebut ke atas menjadi 13 cm

untuk memberikan cadangan keamanan tambahan di kedua tabung. Filtrasi berjalan lancar hampir tanpa luapan.

## KESIMPULAN

Desain sistem filtrasi dengan tabung terbuka harus menerapkan ketinggian tambahan yang lebih tinggi dari nilai minimum untuk mengantisipasi variasi kondisi operasional. Pada kondisi di lokasi di mana sistem filtrasi tersebut didirikan telah dihitung ketinggian tambahan minimal yang diperlukan yaitu 12,1 cm untuk tabung pertama dan 11,2 cm untuk tabung kedua. Tambahan nyata yang diberikan harus di atas nilai itu (dalam hal ini dicobakan 13 cm di kedua tabung) guna memberikan margin keamanan yang lebih besar dalam mengurangi potensi luapan ataupun risiko operasional. Hasilnya cukup menggembirakan, yaitu bahwa hampir tidak terjadi luapan air di bagian atas tabung. Metode tersebut dapat menjadi pegangan praktis yang mudah dalam perancangan tinggi total tabung pada sistem filtrasi pasir tabung terbuka seri.

## DAFTAR PUSTAKA

- American Water Works Association. (2011). *Water quality and treatment: A handbook on drinking water*. McGraw-Hill.
- Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. Dover Publications Inc. New York
- Masters, G. M., & Ela, W. P. (2008). *Introduction to environmental engineering and science*. Pearson Prentice Hall.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2020). *Fluid mechanics: Fundamentals and applications*. McGraw-Hill Education.
- Erdim, E., Akgiray, Ö., & Demir, İ. (2015). A revisit of pressure drop–flow rate

- correlations for packed beds of spheres. *Powder Technology*, 283, 488–504.
- Ergun, S. (1952). Fluid Flow through Packed Columns. *Chemical Engineering Progress*, 48, 89-94.
- Esence, T., Bruch, A., Molina, S., Stutz, B., & Fourmigué, J.-F. (2017). A review on experience feedback and numerical modeling of packed-bed thermal energy storage systems. *Solar Energy*, 153, 628–654.
- Kutz, M. (2013). *Handbook of Environmental Engineering*, Springer.
- Masters, G. M., & Ela, W. P. (2008). *Introduction to environmental engineering and science*. Pearson Prentice Hall.
- Ruya, P. M., Susanto, H., & Purwasasmita, M. (2018). Experimental study on pressure drop and flow dispersion in a packed bed of natural zeolite. In *MATEC Web of Conferences*, 156, 02006.
- Weiner, R., & Matthews, B. (2012). *Principles of water treatment*. John Wiley & Sons, Inc.