

Pengaruh Hubungan Ketebalan dan Effective Size Media Filter Terhadap Efektifitas Filtrasi Saringan Pasir Cepat

Correlation of Media Thickness and Effective Size of Filter Media on the Effectiveness of Filtration of Rapid Sand Filter

Didin Solahudin

Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Pelita Bangsa
solahudin045@gmail.com

Abstract

Rapid sand filter is the most common type of filter used by water treatment plants. Some installations have difficulty to determining the right effective size of media and media thickness to obtain the expected quality and quantity of treated water. Considering the lack of practical guidance available for Water Treatment Plant (WTP) managements to determine the thickness and effective size of filter media, observations were made of several variations in the thickness and effective size of filter media in operating plants. This research was conducted to compare the filtration effectiveness of several variations in thickness and effective size of filter media, so that WTP managers can prepare filter maintenance and operation planning effectively and efficiently. The research method was carried out by observing filters that had variations in the thickness and effective size of the silica sand media. Filtration effectiveness is measured by comparing the turbidity of the inlet and outlet filters of each filter. Data evaluation was carried out using trend analysis and correlation analysis approaches. Media thickness giving effect to the filtration effectiveness at an effective size of 1.01-1.02 mm with a correlation R^2 : 0.9359. The thickness of filter media also giving effect to the standard deviation on filtration effectiveness, this can be seen from the correlation R^2 : 0.9616. In a filter unit with filtration rate around 12.9-13.7 m/hour, the use of filter media with an effective size of 1.01-1.02 mm and 1.0 - 1.2 m thickness can provide filtration effectiveness around 83.8% - 87.3%.

Keywords: Rapid Sand Filter, Filtration Effectiveness, Media Thickness, Effective Size

Abstrak

Saringan pasir cepat merupakan jenis filter yang paling umum digunakan oleh Instalasi Pengolahan Air. Beberapa instalasi memiliki kesulitan dalam menentukan ukuran media dan ketebalan media yang tepat untuk mendapatkan kualitas dan kuantitas hasil olahan yang diharapkan. Mengingat kurangnya panduan praktis yang tersedia bagi pengelola Instalasi Pengolahan Air (IPA) untuk menentukan ketebalan dan effective size dari media filter, maka dilakukan observasi terhadap beberapa variasi ketebalan dan effective size media filter pada IPA yang beroperasi. Penelitian ini dilakukan untuk membandingkan efektifitas filtrasi dari beberapa variasi ketebalan dan effective size media filter, sehingga pengelola IPA dapat membuat perencanaan perawatan dan operasi filter dengan efektif dan efisien. Metode penelitian dilakukan dengan melakukan observasi terhadap filter yang memiliki variasi ketebalan dan effective size media pasir silika. Efektifitas filtrasi diukur dengan membandingkan kekeruhan inlet filter dan outlet masing-masing filter. Evaluasi data dilakukan dengan pendekatan trend analysis dan analisis korelasi. Ketebalan media memberikan pengaruh terhadap efektifitas filtrasi pada effective size 1,01-1,02 mm dengan nilai korelasi R^2 : 0,9359. Ketebalan media filter juga memberikan pengaruh simpangan baku terhadap efektifitas filtrasi, hal tersebut dapat terlihat dari nilai korelasi R^2 : 0,9616. Pada unit filter dengan kecepatan penyaringan 12,9-13,7 m/jam, penggunaan media filter dengan effective size 1,01-1,02 mm dan ketebalan media filter 1,0 – 1,2 m dapat memberikan efektifitas filtrasi sebesar 83,8% - 87,3%.

Kata kunci: Saringan Pasir Cepat, Efektifitas Filtrasi, Ketebalan Media, Effective Size

Pendahuluan

Saringan pasir cepat merupakan jenis filter yang paling umum digunakan oleh Instalasi Pengolahan Air. Dari 14 Instalasi Pengolahan Air di Indonesia yang penulis pernah observasi, beberapa memiliki kesulitan untuk menentukan ukuran media dan ketebalan media yang tepat untuk mendapatkan kualitas dan kuantitas hasil olahan yang diharapkan. Hal tersebut biasanya terjadi saat pengelola instalasi ingin melakukan rehabilitasi ataupun modifikasi terhadap unit filternya.

Secara umum, filtrasi adalah suatu proses dimana air mengalir melalui lapisan permeabel, baik membran, kertas saring, saringan, media berpori atau semacamnya [1]. Dalam proses pengolahan air, filtrasi granular adalah proses mengalirnya air melalui bahan granular, sedangkan padatan tersuspensi (pasir, tanah liat, besi dan flok aluminium) tertahan. Pada filtrasi granular, media berpori adalah lapisan tebal berbahan granular seperti pasir [2]. Adapun mekanisme penghilangannya dapat berupa proses fisik, kimia atau biologis [3].

Terdapat beberapa kemungkinan bagaimana terjadinya proses penyaringan pada media filter, tetapi secara umum filtrasi adalah proses yang memanfaatkan kedalaman media filter. Selama filtrasi, aliran di dalam lapisan filter bersifat laminar; kehilangan tekan (headloss) melalui media akan sebanding dengan kecepatan aliran air [4]. Prinsip utama dalam filtrasi terjadi secara fisik, diantaranya melalui proses gravitasi (atau sedimentasi), intersepsi, difusi hidrodinamik, tarikan dan tolakan. Kontribusi masing-masing mekanisme bergantung pada sifat air dan pengolahan kimianya [4]. Ketika air mengalir melalui lapisan filter, partikel tersuspensi dan koloid tertahan oleh bahan filter. Partikel yang lebih besar dari ukuran media filter akan tetap berada pada lapisan tersebut. Partikel berat rentan terhadap sedimentasi, sedangkan partikel ringan mengalami difusi.

Dalam saringan pasir cepat, penghilangan partikel sebagian besar dilakukan melalui proses fisik, meskipun proses kimia fisika juga dapat terjadi. Ukuran butiran media filter, biasanya berkisar antara 0,4 - 1,5 mm sedangkan partikel yang dapat dihilangkan dengan penyaringan sederhana, misalnya partikel mineral atau diatom, setidaknya berukuran 20 kali lebih kecil, faktanya sebagian partikel bahkan beberapa ratus kali lebih kecil dari ukuran butiran pasir juga dapat dihilangkan [4]. Ada sejumlah variasi pada desain saringan pasir cepat : misalnya ukuran pasir dapat konstan (secara nominal), yaitu pasir monograde, atau dapat bervariasi dari halus hingga kasar yaitu pasir bergradasi; kedalaman pasir bisa dangkal atau dalam; arah aliran air biasanya kebawah namun bisa juga ke atas [4]. Ketika menggunakan pasir halus, pengumpulan padatan terjadi selama filtrasi, sehingga terjadi penumpukan head loss yang cenderung berada di lapisan atas, sedangkan pada pasir kasar, padatan menembus hingga lapisan yang lebih dalam [4].

Pengujian untuk menentukan waktu penyumbatan memungkinkan kita untuk dapat memprediksi kapan filter tidak lagi bekerja karena penurunan aliran atau efisiensi filter [5]. Filter dengan lapisan pasir homogen yang dalam membutuhkan 6-7,5 m³/jam.m² untuk menghilangkan besi dan sekitar 15-18 m³/jam.m² untuk menghilangkan mangan, lalu pada laju filtrasi di atas 15 m³/jam.m² kualitas filtrat cenderung menurun dan pada laju yang melebihi sekitar 20 m³/jam.m² laju peningkatan headloss menjadi terlalu cepat [4]. Laju pertumbuhan head loss memberikan fungsi kapasitas retensi padatan pada filter. Kapasitas retensi padatan maksimum suatu filter merupakan fungsi dari rongga, misalnya filter dengan ketebalan lapisan pasir 0,9 m, dengan celah 45% dan laju filtrasi 7,5 m³/jam.m², dicuci setiap 24 jam, tidak dapat menerima lebih dari 5,6 mg/l kekeruhan tersuspensi atau 20 mg/l kekeruhan tersuspensi dari flok hidroksida ringan dalam influen selama jangka waktu filtrasi [4]. Kapasitas filtrasi ekuivalen masing-masing pada area filtrasi adalah 1012 dan 3544 g/m² [4].

Porositas media filter tergantung pada bentuk butirannya, butiran bulat cenderung memiliki porositas yang lebih rendah dan dapat dicuci dengan laju backwash yang lebih rendah; namun, sebagai filter lateral, memiliki lebih sedikit ruang di dalamnya untuk menahan flok dan padatan yang dikeluarkan dari air dan juga

menghasilkan headloss yang lebih tinggi [6]. Meningkatnya head loss disebabkan oleh berkurangnya luas efektif permukaan filter karena partikel-partikel tersebut terendap pada permukaan filter atau tersangkut di antara pori-pori filter, dengan demikian, dengan waktu filtrasi dan kecepatan filtrasi yang sama, peningkatan head loss lebih cepat pada media filter dengan porositas lebih kecil [7].

Dalam beberapa tahun terakhir, filter telah dirancang untuk menghasilkan kekeruhan air olahan di bawah 0,1 NTU. Kekeruhan rendah ini dicapai dengan memasukkan sejumlah kecil polimer untuk membantu filtrasi [7]. Polimer nonionik dengan berat molekul tinggi umumnya menggunakan dosis 15-25 µg/L, jika polimer tidak digunakan, maka rasio L/d perlu ditingkatkan minimal 20% [7].

Pada beberapa kasus, oksidasi biologis amonia, besi atau mangan dan reaksi biokimia lainnya terjadi ketika air melewati saringan pasir cepat, karena pertumbuhan bakteri yang diperlukan untuk pengotor organik pada butiran filter [4]. Dalam kondisi tekanan atmosfer, nilai saturasi oksigen bervariasi dari sekitar 14 g/m³ pada suhu air 0 °C hingga 8 g/m³ pada 30 °C [8]. Selama proses filtrasi, oksigen tersebut digunakan dalam jumlah kecil untuk oksidasi besi dan mangan, dalam jumlah yang lebih besar untuk degradasi bahan organik, dan dalam jumlah yang lebih besar lagi untuk nitrifikasi ammonia [8].

Dengan 3,6 g oksigen yang diperlukan untuk mengoksidasi 1 g amonia, penghilangan amonia melalui filtrasi cepat terbatas sampai 2 atau 3 g/m³, jika air baku memiliki kandungan amonia yang lebih tinggi, maka diperlukan filtrasi ganda dengan aerasi [8]. Pertumbuhan biologis di dalam filter akan mengurangi volume pori dan dapat meningkatkan penghilangan partikel dengan salah satu mekanisme filtrasi [9]. Organisme mulai tumbuh pada permukaan filter, hingga terbentuk lapisan yang berisi organisme "zoogleal" berlendir yang dikenal sebagai "Schmutzdecke" dan membantu dalam proses filtrasi, namun harus dihilangkan (dibersihkan) ketika headloss yang melalui filter sudah tinggi [4].

Mengingat kurangnya panduan praktis yang tersedia bagi pengelola Instalasi Pengolahan Air (IPA) untuk menentukan ketebalan dan effective size dari media filter, maka dilakukan observasi terhadap beberapa variasi ketebalan dan effective size media filter pada IPA yang beroperasi. Penelitian ini dilakukan untuk membandingkan efektifitas filtrasi dari beberapa variasi ketebalan dan effective size media filter, sehingga pengelola IPA dapat membuat perencanaan perawatan dan operasi filter dengan efektif dan efisien.

Metode Penelitian

Metode penelitian dilakukan dengan melakukan observasi terhadap filter yang memiliki variasi ketebalan dan effective size media pasir silika. Efektifitas filtrasi diukur dengan membandingkan kekeruhan inlet filter dan outlet masing-masing filter. Kecepatan filtrasi saat observasi ada pada rentang 12,9 m/jam – 13,7 m/jam. Pengambilan sampel air dilakukan satu kali perhari pada jam 10 pagi selama 24 hari. Pengukuran ketebalan media filter dan effective size diambil dari 6 titik sampling untuk masing-masing bak filter. Jumlah filter yang diobservasi adalah 7 unit. Evaluasi data dilakukan dengan pendekatan trend analysis dan analisis korelasi.

Hasil dan Pembahasan

Hasil Observasi

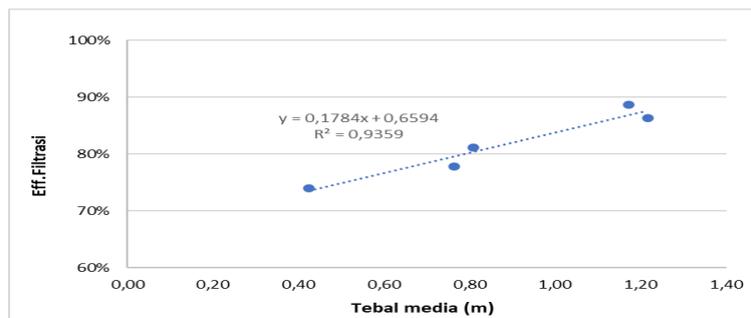
Dari observasi yang dilakukan selama 24 hari terhadap 7 unit filter, didapatkan hasil sebagai berikut :

Tabel

Tabel harus diberi nomor sesuai urutan presentasi (Tabel 1, dst.). Judul tabel ditulis diatas tabel dengan posisi rata tengah (center justified), tidak ada cetak tebal maupun berwarna. Font yang dipakai berukuran 9pt baik judul tabel maupun isi tabel. Tabel harus diacu dan dirujuk dalam manuskrip dan jarak 1 spasi. Tidak ada garis tegak lurus dalam tabel.

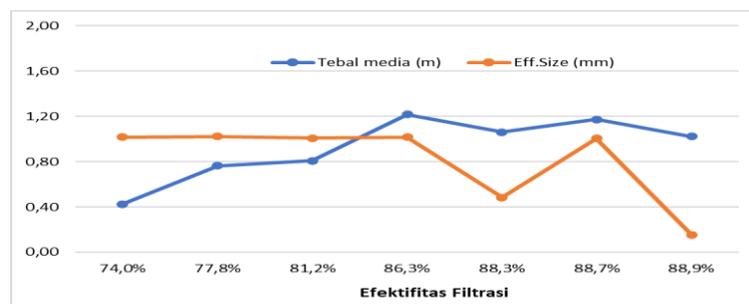
Tabel 1. Pengamatan Efektifitas Filtrasi

Parameter	Satuan	Unit Filter						
		A	B	C	D	E	F	G
Tebal media	m	1,17	1,06	0,81	0,43	0,77	1,22	1,02
Effective Size	mm	1,01	0,48	1,01	1,02	1,02	1,02	0,15
Uniformity Coefficient	-	1,13	2,20	1,12	1,10	1,12	1,11	6,71
Effektifitas Filtrasi	%	89%	88%	81%	74%	78%	86%	89%
Std.Deviasi	%	3,1%	4,8%	5,6%	9,2%	5,4%	3,0%	2,5%

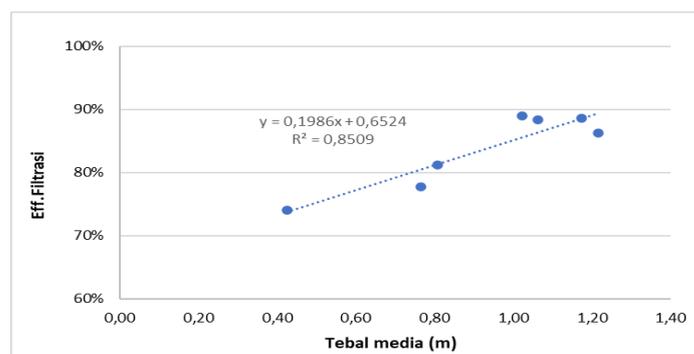


Gambar 1. Kurva Pengamatan Efektifitas Filtrasi

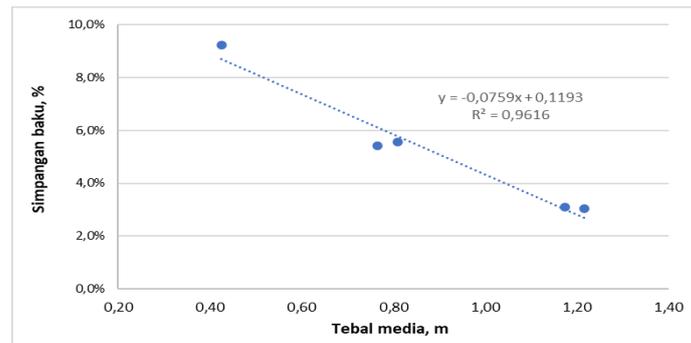
Berdasarkan pengamatan melalui kurva sebaran ketebalan media, effective size dan efektifitas filtrasi tidak terlihat adanya trend korelasi antara effective size dengan efektifitas filtrasi, namun terlihat bahwa terdapat trend korelasi antara ketebalan media dengan efektifitas filtrasi. Oleh sebab itu, maka evaluasi data dilanjutkan dengan pengujian korelasi antara ketebalan media dengan efektifitas filtrasi.



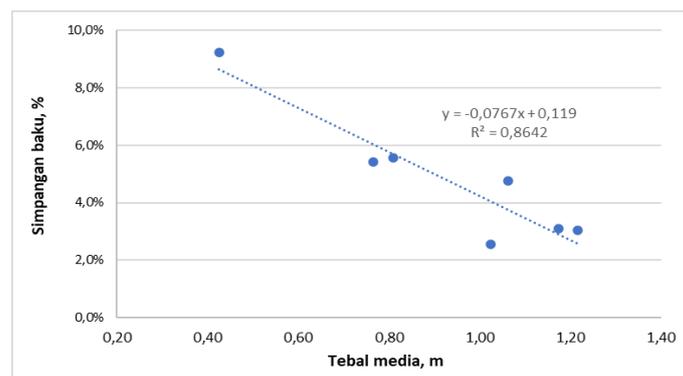
Gambar 2. Korelasi tebal media dengan efektifitas filtrasi pada eff.size 1,01-1,02 mm



Gambar 3. Korelasi tebal media dengan efektifitas filtrasi pada eff.size beragam



Gambar 4. Korelasi simpangan baku efektifitas filtrasi dengan ketebalan filter pada effective size relatif sama



Gambar 5 Korelasi simpangan baku efektifitas filtrasi dengan ketebalan filter pada effective size beragam

Pengaruh ketebalan media terhadap efektifitas filtrasi pada effective size 1,01-1,02 mm memberikan korelasi R^2 : 0,9359, sedangkan pengaruh ketebalan media terhadap efektifitas filtrasi pada effective size beragam memberikan korelasi R^2 : 0,8509. Hal tersebut memberikan gambaran bahwa terdapat korelasi kuat antara ketebalan media filter dengan efektifitas filtrasi dan effective size juga memberikan pengaruh namun belum bisa pola korelasinya.

Ketebalan media filter juga memberikan pengaruh simpangan baku terhadap efektifitas filtrasi, hal tersebut dapat terlihat dari nilai korelasi R^2 : 0,9616 pada effective size 1,01-1,02 mm. Pada unit filter yang memiliki effective size beragam, didapatkan korelasi pengaruh simpangan baku terhadap efektifitas filtrasi sebesar R^2 : 0,8642.

Merujuk pada SNI 6774:3023 tentang Tata cara perencanaan unit paket instalasi pengolahan air, kecepatan penyaringan untuk unit filter gravitasi adalah 6-11 m/jam [10], sedangkan unit filter yang diobservasi memiliki kecepatan penyaringan di atasnya yaitu 12,9-13,7 m/jam. Ketebalan media sesuai kriteria 0,3-0,7 m, sedangkan pada unit yang diobservasi 0,4 – 1,2 m. Adapun effective size sesuai kriteria 0,3-0,6 mm, sedangkan pada unit yang diobservasi 0,15 – 1,02 mm.

Ada dua faktor yang sangat penting dalam memutuskan untuk memilih media filter, yaitu waktu yang dibutuhkan partikel untuk menembus lapisan filter dan waktu yang diperlukan filter untuk mencapai head loss maksimum [6]. Ketika terjadi penyumbatan pada lapisan filter, kehilangan tekanan akan meningkat. Pada awalnya effluen dari filter mempunyai kekeruhan yang sama, setelah beberapa waktu, susunan lapisan media filter akan rusak, menyebabkan kekeruhan effluen meningkat dengan cepat [11]. Semakin kecil ukuran efektifnya (effective size) media pasir, maka semakin rendah kekeruhan effluen yang dicapai, namun, pada ketebalan media yang optimal, perbedaannya tidak signifikan [12].

Pertumbuhan bakteri di dalam butiran media filter meningkatkan penghilangan bahan organik dan padatan tersuspensi [13] menyebabkan penyumbatan filter. Beberapa faktor mempengaruhi kehilangan tekan (headloss) adalah ketika tekanan yang diberikan pada filter meningkat dan aliran meningkat, maka penyumbatan terjadi lebih cepat karena banyaknya padatan yang masuk ke dalam filter [6]. Saat proses adsorpsi, terjadi pengurangan partikel yang lebih kecil dan partikel tersuspensi seperti partikel koloid dan partikel terlarut [12], [14].

Besar kecilnya partikel yang terkandung dalam air dan konsentrasinya mempengaruhi head loss, ketika menggunakan dua jenis padatan tersuspensi berukuran beda dengan peningkatan konsentrasi, ditemukan bahwa jika ukuran partikel serta konsentrasi meningkat maka head loss akan meningkat, hal ini disebabkan oleh retensi partikel [5].

Clean bed headloss didefinisikan sebagai kehilangan head pada filter yang bersih setelah siklus pencucian filter (backwash) [11]. Headloss merupakan istilah yang digunakan untuk menggambarkan gaya tambahan (tekanan, atau head) yang diperlukan untuk mendorong air melalui pori media filter seiring berjalannya waktu [11]. Saat pori-pori terisi partikel, volume pori-pori yang kosong semakin kecil. Karena volume pori-pori kosong berkurang, ketika filter beroperasi pada mode laju konstan, kecepatan air akan meningkat karena semakin sedikit ruang bagi air untuk bergerak di antara media filter [11]. Instalasi pengolahan air kadang-kadang mengalami peningkatan headloss yang signifikan jauh sebelum headloss terjadi pada lapisan flok yang terbentuk pada permukaan media atau pada beberapa inci bagian atas lapisan filter, efek ini kadang disebut "Surface blinding" yaitu headloss akan meningkat lebih cepat namun lolosnya kekeruhan tidak akan terjadi karena partikel yang lolos dari bagian atas filter masih dapat terperangkap di titik yang lebih dalam di dalam media filter [11]

Proses filtrasi akan terhenti saat headloss melampaui nilai yang ditetapkan atau saat terjadi peningkatan kekeruhan air hasil filtrasi, ataupun lolosnya floc [12]. Pada tekanan atmosfer dan suhu normal, air dapat menampung sekitar 3% volume udara (terutama oksigen dan nitrogen) dalam larutan, karena jumlah udara yang terdapat pada larutan sekitar $100/34 = 3\%$ per kaki (9,65% per m) dari tekanan negatif, maka tidak perlu waktu lama untuk mengisi ruang pori-pori filter atau volume sistem underdrain [12]. Filter kemudian menjadi terikat dengan udara, head loss meningkat tajam, dan kapasitas keluaran filter turun dengan cepat [12].

Ada dua jenis gaya yang mengakibatkan tarik-menarik dan tolak-menolak partikel. Gaya VanderWaals memastikan bahwa dua benda tertarik, sedangkan Gaya elektrostatis dapat menimbulkan efek tarik menarik atau tolak menolak, bergantung pada muatan partikelnya, dan secara umum bahan penyaring (pasir) dengan partikel tersuspensi dan koloid mempunyai muatan negatif sehingga terjadi tolakan [1]. Sedimentasi pada filter terjadi saat gravitasi dan kecepatan pengendapan partikel yang terkait menyebabkannya menyimpang dari garis aliran dan menabrak media filter [3]. Sedangkan mekanisme penahanan (straining) akan mengakibatkan hilangnya partikel besar di permukaan dan partikel kecil di titik kontak antar butiran pasir [15]. Jika partikel mengikuti garis aliran berada sangat dekat dengan permukaan media filter, maka partikel tersebut akan mengenai butiran media dan ditangkap dan disebut sebagai intersepsi [3].

Berdasarkan pada lebih dari 200 studi percontohan dan data kinerja dari banyak operasional filter, rasio L/d , dimana L adalah kedalaman lapisan dalam mm dan d adalah ukuran efektif media dalam mm, dapat digunakan [16]. Nilai rasio L/d harus > 1000 pada filter pasir cepat, > 1300 pada filter pasir kasar lapisan dalam dengan d 1,2 - 1,4 mm dan L 1,8-2 m, dan > 1500 pada filter pasir paling kasar yaitu $d \geq 1,5$ mm [16]. Jika diameter media melebihi 1,5 mm, jarak antar butiran menjadi lebih besar dibandingkan dengan ruang kosong pada lapisan media filter umumnya [16].

Kesimpulan

Ketebalan media memberikan pengaruh terhadap efektifitas filtrasi pada effective size 1,01-1,02 mm dengan nilai korelasi R2: 0,9359, dan pada effective size beragam memberikan korelasi R2: 0,8509. Hal tersebut memberikan gambaran bahwa terdapat korelasi kuat antara ketebalan media filter dengan efektifitas filtrasi. Effective size juga memberikan pengaruh namun belum bisa dilihat pola korelasinya. Ketebalan media filter juga memberikan pengaruh simpangan baku terhadap efektifitas filtrasi, hal tersebut dapat terlihat dari nilai korelasi R2: 0,9616 pada effective size 1,01-1,02 mm. Pada unit filter yang memiliki effective size beragam, didapatkan korelasi pengaruh simpangan baku terhadap efektifitas filtrasi sebesar R2: 0,8642. Pada unit filter dengan kecepatan penyaringan 12,9-13,7 m/jam, penggunaan media filter dengan effective size 1,01-1,02 mm dan ketebalan media filter 1,0 – 1,2 m dapat memberikan efektifitas filtrasi sebesar 83,8% - 87,3%.

Daftar Rujukan

- [1] Tu Delft, "Granular filtration Water Treatment," *Tu Delft Open Course Ware*. Delft University of Technology, pp. 82–101.
- [2] J. C. Crittenden, R. R. Trussell, D. W. Hand, K. J. Howe, and G. Tchobanoglous, "Granular Filtration," in *MWH's Water Treatment*, John Wiley & Sons, Inc., 2012, pp. 727–818.
- [3] F. Xue, P. J. Visser, and A. P. Z. Zhi, "The Effect of Backwashing Procedures on Filter Ripening and General Effluent Quality," 2011.
- [4] M. J. Brandt, K. M. Johnson, A. J. Elphinston, and D. D. Ratnayaka, "Water Filtration," in *Twort's Water Supply*, Elsevier, 2017, pp. 367–406.
- [5] R. M. B. Khelladi, A. C. Fella, M. Pontié, and F. Z. Guellil, "Influence of Particle and Grain Size on Sand Filtration: Effect on Head Loss and Turbidity," *Aquatic Science and Technology*, vol. 8, no. 2, p. 36, Aug. 2020, doi: 10.5296/ast.v8i2.17512.
- [6] were Noel Bourke, G. Carty, M. Crowe, and M. Lambert, "Water Treatment Manual Filtration," 1995.
- [7] M. Fajar, E. Sembiring, and M. Handajani, "The Effect of Filter Media Size and Loading Rate to Filter Performance of Removing Microplastics using Rapid Sand Filter," *Journal of Engineering and Technological Sciences*, vol. 54, no. 5, 2022, doi: 10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.5.12.
- [8] L. Prof. Dr. Ir. Huisman, "Rapid filtration," Delft, 2004.
- [9] B. A. Assist. Prof. Kocamemi, "ENVE 301, Environmental Engineering Unit Operations, Chapter 12 : Filtration," Istanbul, 2014.
- [10] BSN, *SNI 6774:2023, Tata Cara Perencanaan Unit Paket Instalasi Pengolahan Air*. Indonesia: Badan Standardisasi Nasional, 2023, pp. 1–35.
- [11] "Filter Assessments Understanding What You See," Texas, Aug. 2019.
- [12] N. K. Shammass and L. K. Wang, *Water Engineering, Hydraulics, Distribution and Treatment*, 1st ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.
- [13] G. Sodamade, E. Longe, and A. Sangodoyin, "Depth and performance evaluation of a laboratory scale sand filtration system for wastewater treatment," *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, vol. 38, no. 2, pp. 209–216, 2014, doi: 10.3906/muh-1405-9.
- [14] D. Maryani, A. Masduki, and A. Moesriati, "Pengaruh Ketebalan Media dan Rate filtrasi pada Sand Filter dalam Menurunkan Kekeruhan dan Total Coliform," *JURNAL TEKNIK POMITS*, vol. 3, pp. 76–81, 2014.
- [15] J. L. Cleasby, "Selection of optimum filtration rates for sand filters," Iowa, 1960. [Online]. Available: <https://lib.dr.iastate.edu/rtd>.
- [16] S. Kawamura, "Design and Operation of High Rate Filters," *AWWA*, vol. 90, pp. 77–90, Dec. 1999.