

## Optimasi Konfigurasi Kolom Adsorpsi Portabel Tersirkulasi Pada Proses Pemurnian Air Tanah Karst

### Optimization of Circulating Portable Adsorption Column Configuration in Karst Groundwater Purification Process

Mohammad Prasanto Bimantio<sup>1,\*</sup>, Amallia Ferhat<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian STIPER, Yogyakarta - Indonesia

<sup>2</sup> Agribisnis, Fakultas Pertanian, Institut Pertanian STIPER, Yogyakarta - Indonesia

\*Email: [bimantiomp@instiperjogja.ac.id](mailto:bimantiomp@instiperjogja.ac.id)

#### Abstrak

Ketersediaan air bawah tanah karst yang berlimpah disertai kualitas air yang baik pada musim kemarau namun relatif menurun kualitasnya pada musim penghujan membutuhkan adanya teknologi penyediaan dan pemurnian air yang efisien. Tujuan penelitian adalah mengetahui konfigurasi optimum desain alat pemurnian air karst menggunakan prinsip adsorpsi. Adsorben komposit yang digunakan pada penelitian ini antara lain: *volcanic rock*, karbon aktif, zeolit, *ammonite*, dan *ceramic biological beads*. Setiap bahan akan disusun dalam *honeycomb filter bag* sehingga mudah dalam pemasangan dan pembersihannya. Sumber air yang akan dimurnikan berasal dari Wilayah Gua Jepang Berbah Sleman. Alat terdiri dari 3 bagian, yaitu: distributor atas, kolom isian, dan pengumpul bawah. Prinsip dari ketiga bagian tersebut adalah seperti konsep bongkar pasang yang dapat diatur jumlah tingkat kolom isianya mengikuti kebutuhan pemurnian yang diinginkan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa hasil analisis TDS dan pH hasil adsorpsi menunjukkan bahwa tingkat adsorpsi tidak memberikan beda nyata. Namun proses adsorpsi menggunakan kolom adsorpsi portabel tersirkulasi mampu mengurangi kandungan TDS pada air karst dibandingkan sebelum proses. Proses adsorpsi 3 tingkat menjadi pilihan konfigurasi proses paling optimum dibandingkan tingkatan lainnya. Tingkat tersebut dipilih karena diperoleh nilai TDS paling minimum dan nilai pH yang paling stabil dan memenuhi kriteria batas standar air bersih. Perlu adanya pengembangan dari segi keseragaman pola dan tekanan aliran fluida dan proses pretreatment adsorben yang lebih baik agar hasil adsorpsi dapat lebih baik dan optimal. Penelitian ini juga dapat dilanjutkan dengan melakukan optimasi untuk kemudian diarahkan ke analisis ekonomi yang dapat memberikan biaya produksi terhadap hasil yang paling minimum.

**Kata Kunci:** adsorpsi, karst, kolom, optimasi, sirkulasi

#### Abstract

*The availability of abundant karst underground water with good water quality in the dry season relatively low quality in the rainy season requires efficient water supply and purification technology. The aim of the study was to determine the optimum configuration of the karst water purification device using the adsorption principle. Composite adsorbents used in this study include: volcanic rock, activated carbon, zeolite, ammonite, and ceramic biological beads. Each material will be arranged in a honeycomb filter bag so that it is easy to install and clean. The source of the water to be purified comes from the Japanese Cave Berbah Sleman Region. The tool consists of 3 parts, namely: the top distributor, the stuffing column, and the bottom collector. The principle of the three parts is like the concept of dismantling and installing which can be adjusted the number of levels of the column according to the desired purification needs. The results of this study indicate that the results of the analysis of TDS and pH of the adsorption results indicate that the level of adsorption does not give a significant difference. However, the adsorption process using a circulating portable adsorption column was able to reduce the TDS content in karst water compared to before the process. The 3-stage adsorption process is the most optimum choice of process configuration compared to other stages. This level was chosen because it obtained the minimum TDS value and the most stable pH value and met the criteria for clean water standards. There is development needed in terms of uniformity of fluid flow patterns and pressures and a better adsorbent pretreatment process so that the*

*adsorption results can be better and optimal. This research can be continued by optimizing and then directed to an economic analysis that can provide the minimum production costs for the results.*

*Keywords: adsorption, karst, column, optimization, circulation*

## 1. PENDAHULUAN

Karst adalah suatu kawasan yang mempunyai karakteristik relief dan drainase yang khas, terutama disebabkan oleh derajat pelarutan batuan-batuannya dalam air, yang lebih tinggi dari tempat lain. Karst sebagai medan dengan karakteristik hidrologi dan bentuk lahan yang diakibatkan oleh kombinasi dari batuan mudah larut dan mempunyai porositas sekunder yang berkembang baik (Ford & Williams, 1992). Gunung karst terbentuk sebagai hasil proses abrasi dan *uplifting* yang ditunjukkan dengan adanya lapisan batu gamping. Saat hujan turun, sebagian air menghilang ke dalam lubang pembuangan, menembus sambungan, dan melarutkan dinding batugamping (Ferhat et al., 2021).

Pada wilayah – wilayah yang berada di lahan karst kebutuhan air seringkali mengalami keterbatasan. Air merupakan kebutuhan pokok yang ketersediaannya mutlak dibutuhkan. Jika dikaitkan dengan upaya menciptakan kemandirian lokal, maka ketersediaan air adalah salah satu kunci keberhasilan. Perlu upaya untuk menyelesaikan persoalan keterbatasan air dengan mengadopsi teknologi penyediaan dan pemurnian air yang efisien (Firmansyah, Mawandha, & Bimantio, 2020).

Daerah karst merupakan bagian dari pegunungan dimana formasi karst terdiri dari batuan karbonat yang memiliki kelarutan dan tingkat laju infiltrasi yang tinggi. Air hujan yang jatuh di permukaan akan langsung meresap ke dalam tanah dan membentuk sungai-sungai bawah tanah. (Ford & William, 2007) Hal ini menyebabkan sulitnya mendapatkan air bersih di permukaan terutama saat musim kemarau. Namun demikian, karena karakteristik batuan karst yang unik, ketersediaan air bawah tanah sangat berlimpah, dengan kualitas air yang relatif baik pada musim kemarau namun relatif menurun kualitasnya pada musim penghujan. Penurunan kualitas air bawah tanah tersebut disebabkan oleh terbawanya material dari permukaan ke sungai bawah tanah melalui ponor-ponor yang ada sehingga menyebabkan nilai kekeruhan atau turbiditas, bakteri *E. Coli*, dan *Total Coliform* meningkat.

Dengan potensi cadangan air bawah tanah yang besar di daerah karst, masyarakat dapat memanfaatkan air ini dengan menggunakan teknologi tepat guna (Nestmann, Oberle, Ikhwan, & Klingel, 2011).

Kualitas kimia air tanah pada daerah karst akan dipengaruhi oleh interaksi antar airtanah dengan mineral penyusun batuan dengan proses utama berupa pelarutan. Untuk daerah karst reaksi airtanah

dengan batuan karbonat merupakan proses yang sangat penting terkait dengan komposisi kimia airtanah. Kandungan karbondioksida dalam airtanah sangat berpengaruh dengan agresivitas airtanah terhadap batuan karbonat.

Pemurnian air tanah karst seperti yang dilakukan oleh Nugraha (2016) ialah menggunakan saringan pasir lambat sebagai media pemurnian. Dimana metode tersebut belum efisien dan mampu untuk mengurangi parameter kekeruhan, bakteri *E-coli* dan total coliform dari air tanah karst.

Adsorpsi merupakan salah satu bentuk dari *sorption operation*. Ada dua komponen penting dalam adsorpsi yakni fase berpindah (*adsorbate*) dan penjerap (*adsorbent*). Mekanisme adsorpsi pada dasarnya adalah proses penjerapan yang terjadi pada permukaan padatan. Transfer massa yang terjadi didasarkan pada permukaan yang aktif. Mula-mula molekul mendifusi melalui *macropore*, kemudian melalui *mesopore*, hingga akhirnya molekul terjerap dalam *micropore* dan tertahan didalamnya (Mc Cabe, Smith, & Harriott, 2018). Pengaruh ukuran dan waktu aktivasi adsorben terhadap daya jerapnya sangat bervariasi (Bimantio, 2017).

Menara adsorpsi yang banyak digunakan adalah bentuk kolom tetap dan tumpukan bahan isian yang berhamburan. Hal ini membuat kesulitan ketika akan membersihkan dan mengisi adsorben, serta tumpukan adsorben yang tidak beraturan berpotensi menghalangi aliran fluida yang akan dimurnikan (Bimantio, Oktavianty, & Widiasaputra, 2020).

Beberapa desain kolom adsorpsi terdahulu masih menggunakan model satu kolom utuh dengan ketinggian tertentu dan bahan isian dimasukkan secara sporadis. Katherine dan Arie (2016) merancang desain kolom adsorpsi menggunakan kaca yang mudah pecah dan berbentuk satu kolom sepanjang 0,3 m dengan diameter 0,04 m. Pembersihan kolom harus dilakukan dengan membogkar seluruh isi adsorben yang ada di kolom dan konfigurasi ini tidak bisa dikustomisasi secara bebas, baik dari sisi dimensi maupun proses *scale-up*.

Mutiari dkk., (2013) menggunakan kolom adsorpsi dengan metode penukaran ion melalui resin untuk pemurnian biogas menggunakan satu kolom vertikal berbahan SS304 dengan diameter 0,254 m dan tinggi 1,35 m. Bahan ini secara durabilitas sangat baik, namun dari segi portabilitas cukup berat ketika di bawa dan sangat tinggi dalam biaya pembuatannya. Hal serupa juga seperti kolom adsorpsi yang didesain oleh Rambe dkk.,(2018) untuk adsorpsi gas H<sub>2</sub>S limbah pabrik kelapa sawit,

menggunakan satu dua kolom vertikal berbahan *stainless steel* dengan tinggi 5,6 meter dan diameter 4 cm dimana akan sulit Ketika ingin dilakukan pembersihan dan pemindahan alat.

Lutfi dkk., (2018) membuat desain kolom adsorpsi yang dapat dikustomisasi dalam bentuk bak penyaringan mendatar dengan susunan teras yang digunakan untuk pemurnian limbah cair batik tulis. Kolom tersebut memiliki sistem yang membuatnya dapat melakukan pembersihan dan regenerasi adsorben secara parsial. Jumlah kolom dapat disesuaikan dengan tingkat adsorpsi, namun harus mempertimbangkan desain dari bak tersebut, karena berbentuk horizontal sehingga membutuhkan ruangan yang lebih besar dibandingkan dengan kolom berbentuk vertikal.

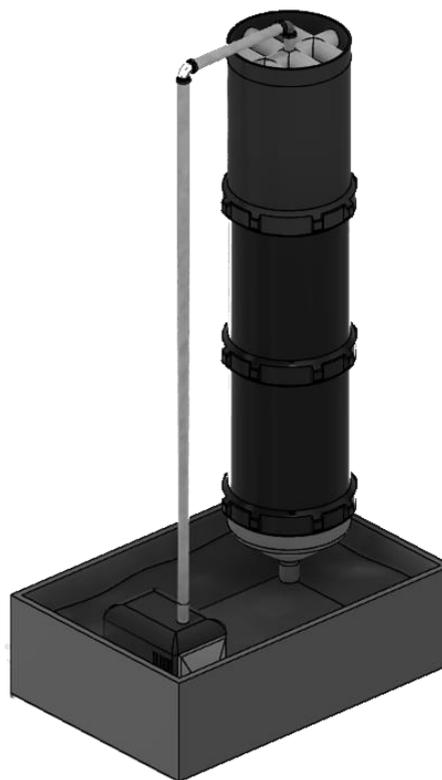
Kolom adsorpsi dengan sistem portabel didasari oleh paten desain industri Kolom Adsorpsi Modular Portabel (Patent No. IDD0000059215, 2021). Dalam penggunaannya pada penelitian terdahulu, kolom adsorpsi jenis portabel digunakan sebagai media pemurnian biodiesel dan air laut yang mampu untuk menjerap pengotor yang ada pada kedua fluida tersebut.

Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui konfigurasi optimum desain alat pemurnian air karst menggunakan prinsip dasar adsorpsi. Alat ini memberi manfaat dari segi portabilitas, daya jera, kemudahan aplikasi dan pemeliharaan. Pada penelitian ini diharapkan mampu menentukan titik optimum dari adsorben yang digunakan untuk dapat diketahui titik waktu adsorpsi yang paling singkat dan jangka waktu penggantian adsorben.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dilakukan selama mulai Juni hingga Oktober 2021. Penelitian mengambil lokasi di wilayah Gua Jepang Berbah Sleman, dan Pilot Plant Instiper Yogyakarta.

Alat utama dalam penelitian ini merupakan pengembangan dari kolom adsorpsi yang didesain oleh Bimantio, dkk. (2020) menjadi bentuk konfigurasi baru seperti pada gambar 1. Alat pemurnian berbentuk silindris dengan sejumlah plat sebagai sangga bahan isian dan distributor serta peningkat waktu tinggal aliran agar meningkatkan kontak antara adsorben dan fluida selama pemurnian. Alat terdiri dari 3 bagian, yaitu: distributor atas, kolom isian, dan pengumpul bawah. Prinsip dari ketiga bagian tersebut adalah seperti konsep bongkar pasang yang dapat diatur jumlah tingkat kolom isiannya mengikuti kebutuhan pemurnian yang diinginkan (gambar 2). Ketiga bagian alat tersebut dihubungkan dengan ulir untuk kemudahan pembersihan dan dapat dibongkar pasang sesuai keinginan.



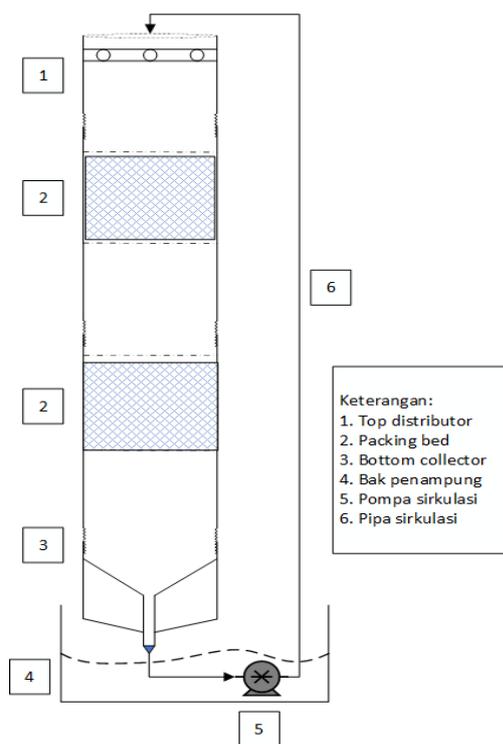
Gambar 1. Desain Kolom Adsorpsi untuk Pemurnian Air Tanah Karst



Gambar 2. Rangkaian Kolom Adsorpsi Portabel Bersirkulasi

Adsorben komposit yang digunakan pada penelitian ini antara lain: volcanic rock, karbon aktif, zeolit, ammonite, dan ceramic biological beads. Massa tiap adsorben komposit yang digunakan adalah 600 gram per plat. Setiap bahan akan disusun dalam *honeycomb filter bag* sehingga mudah dalam pemasangan dan pembersihannya di kolom adsorpsi. Sumber air yang akan dimurnikan berasal dari Wilayah Gua Jepang Berbah Sleman untuk air Karst.

Variabel yang dipakai adalah tingkat filtrasi, dimana kolom adsorpsi ini mampu melakukan filtrasi hingga 3 tingkatan. Dengan jumlah pengulangan sebanyak 3 kali untuk tiap variabel, maka akan diperoleh sebanyak 18 satuan eksperimental. Sedangkan parameter yang ditinjau pada penelitian ini adalah pH, konduktivitas, dan *total dissolve solid* (TDS), dimana sampel diambil tiap 5 menit setelah proses sirkulasi berjalan, kemudian data yang diperoleh diplot pada grafik *time series*.



**Gambar 3.** Skema Sistem Filtrasi Air Berbasis Adsorpsi dan Sirkulasi

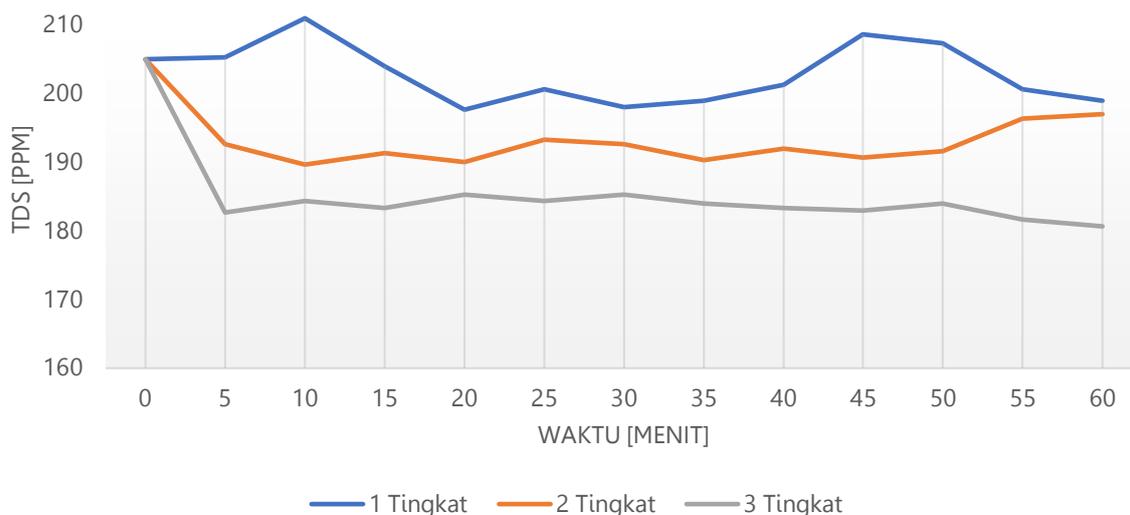
Konstruksi alat penelitian disusun berdasarkan representasi kolom adsorpsi rancangan Bimantio dan Ferhat (2021) seperti pada gambar 3, dimana selain kolom terdapat pula sistem sirkulasi air untuk menjamin proses filtrasi dapat berjalan dengan maksimal. Sistem sirkulasi menggunakan bak penampung sebagai penampung aliran dan pompa sirkulasi sebagai pendorong dari bak ke input kolom adsorpsi.

Grafik yang terbentuk dapat memperlihatkan waktu optimum hingga fluida hasil filtrasi telah memenuhi standar dari parameter yang diuji. Di sisi lain, grafik yang terbentuk berguna untuk mengetahui titik jenuh dari adsorben, sehingga dapat diprediksi waktu regenerasi untuk penggantian adsorben.

Tiap parameter akan diuji secara statistik untuk melihat perbandingan kualitas air sebelum dan sesudah dilakukan filtrasi. Perbandingan variabel akan dilakukan menggunakan uji anova untuk melihat adanya pengaruh dari tiap variabel.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis TDS pada sampel air karst menunjukkan bahwa proses adsorpsi menggunakan kolom adsorpsi portabel tersirkulasi mampu mengurangi kandungan TDS pada air karst, sesuai dengan hasil uji-t secara statistik menggunakan SPSS menunjukkan bahwa ada beda nyata (nilai signifikansi  $<0.05$ ) antara hasil adsorpsi dengan nilai TDS awal air sampel (205 ppm).



**Gambar 4.** Grafik Perubahan TDS pada Air Karst sepanjang Waktu Proses Adsorpsi

Adsorpsi 1 tingkat belum mampu mengadsorpsi secara optimal karena jumlah adsorber yang lebih sedikit, hal ini dapat pula disebabkan karena kecepatan aliran yang cenderung lambat dan tekanan aliran yang kecil, sehingga menyebabkan terjadinya *flooding* pada bahan isian, sehingga air yang harusnya mengalir malah tertahan di plat bahan isian yang membuat kejenuhan adsorber cepat terjadi.

Titik optimum pada proses adsorpsi air karst seperti pada tabel 1, terjadi pada proses adsorpsi 3 tingkat, dimana pada tingkatan tersebut diperoleh

nilai TDS hasil adsorpsi paling minimum. Hal ini disebabkan pada adsorpsi 3 tingkat, fluida cenderung tidak membentuk *flooding* pada paket bahan isian, hal ini disesuaikan pula dengan tekanan dan kecepatan aliran yang optimum pada adsorpsi 3 tingkat tersebut. Dengan kecepatan dan tekanan alir yang sama, semakin banyak jumlah tingkatan, maka akan semakin besar luas area pada bahan isian yang menyebabkan peningkatan kontak, sehingga dapat memaksimalkan jumlah kotoran yang mampu diserap.

**Tabel 1.** Titik Optimum Hasil Adsorpsi TDS Sampel Air Karst

Tingkat	Persamaan	R <sup>2</sup>	t (menit)	TDS (ppm)
1	$y = -0.0292x^3 + 0.6987x^2 - 5.0516x + 212.86$	0.215	5.54	201.35
2	$y = -0.0282x^3 + 0.8266x^2 - 6.8522x + 207.11$	0.622	5.97	189.66
3	$y = -0.0722x^3 + 1.6791x^2 - 11.962x + 209.07$	0.644	5.55	182.06

Hasil Tabel Anova (tabel 2) untuk variabel TDS pada sampel air karst menunjukkan nilai signifikansi yang >0.05, sehingga tidak terdapat

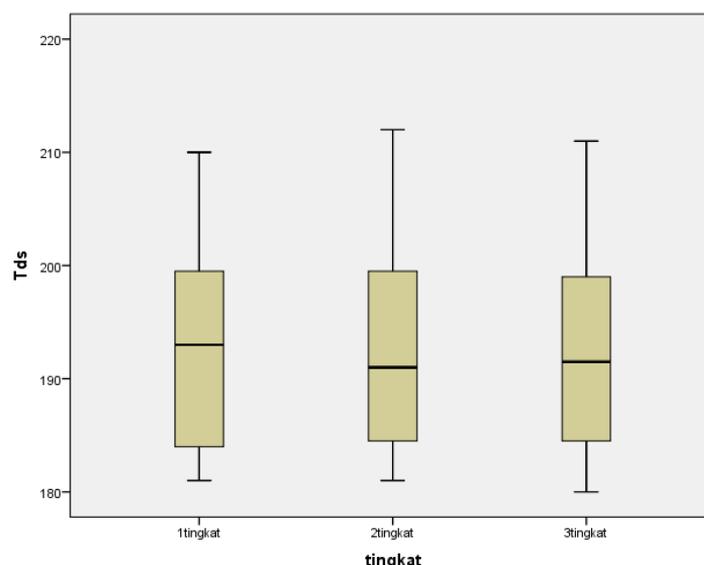
beda nyata antara jumlah tingkat filtrasi pada proses adsorpsi yang dilakukan terhadap nilai TDS hasil adsorpsi.

**Tabel 2.** ANOVA Variabel TDS Sampel Air Karst

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	5.130	2	2.565	.035	.965
Within Groups	7663.194	105	72.983		
Total	7668.324	107			

Hal ini dikarenakan nilai TDS awal dari sampel sudah jauh lebih rendah daripada air laut, sehingga daya jera bahan isian kurang maksimal. Hal ini dapat disimpulkan bahwa tingkat adsorpsi belum memberikan perbedaan terhadap hasil TDS hasil air karst, meskipun dengan titik optimum pada adsorpsi 3 tingkat seperti terlihat pada *Boxplot* gambar 5.

Proses adsorpsi yang dilakukan pada penelitian ini mampu memberikan nilai TDS yang lebih baik dibandingkan penelitian sejenis. Siswoyo dkk.(2019) yang melakukan karakteristik hidrokimia mata air karst di Kabupaten Tuban menunjukkan nilai 304 hingga 381 ppm.

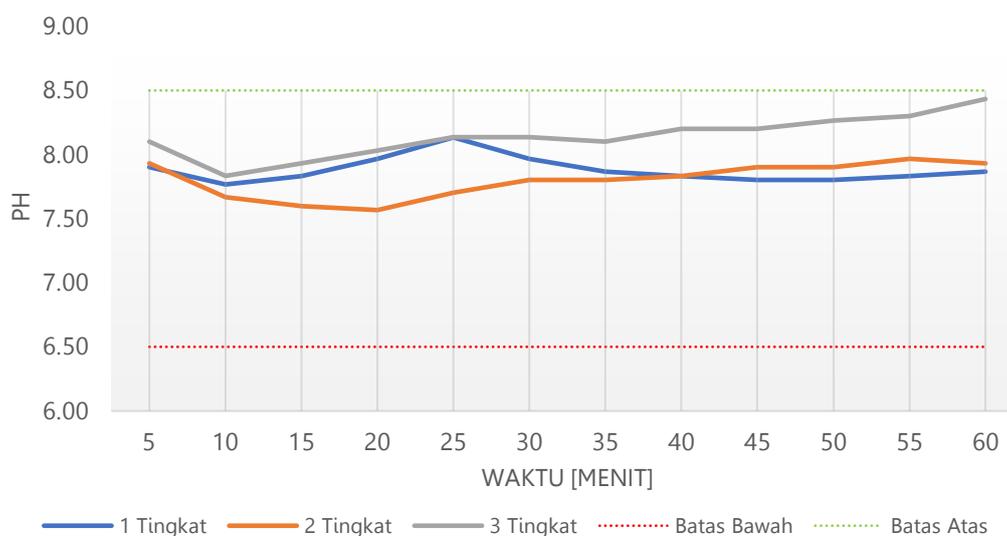


**Gambar 5.** Boxplot TDS Hasil Adsorpsi pada Sampel Air Karst

Hasil analisis pH pada sampel air karst menunjukkan bahwa proses adsorpsi menggunakan kolom adsorpsi portabel mampu untuk menjaga kandungan pH pada air karst pada standar yang ditentukan (6.5 – 8.5). Seperti terlihat pada gambar 6, proses adsorpsi 2 tingkat pada awalnya mampu untuk mengurangi pH sampel air karst hingga mendekati pH netral namun seiring berjalannya waktu, terjadi kejenuhan pada adsorben dan menyebabkan nilai pH kembali meningkat. Untuk proses adsorpsi 3 tingkat, nilai pH mencapai batas atas pada menit ke 60 dan terus naik, sedangkan pada proses adsorpsi 1 dan 2 tingkat, nilai pH mulai

stagnan pada menit ke 35. Di sisi lain, proses adsorpsi tingkat lainnya tidak secara signifikan mampu mengurangi pH air karst, namun nilai pH tetap terjaga pada batas standar. Sesuai dengan hasil uji-t secara statistik menggunakan SPSS menunjukkan bahwa ada beda nyata (nilai signifikansi <0.05) antara hasil adsorpsi dengan nilai pH awal air sampel.

Hasil nilai pH pada penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian dari Sumbada dkk.(2016) yang melakukan penelitian analisis kualitas air karst di sumber mata air Karang dan Kaliorang menghasilkan nilai pH antara 6,94 hingga 8,26.



**Gambar 6.** Grafik Perubahan pH pada Air Karst sepanjang Waktu Proses Adsorpsi

Hasil Tabel Anova (tabel 3) untuk variabel pH pada sampel air karst menunjukkan nilai signifikansi

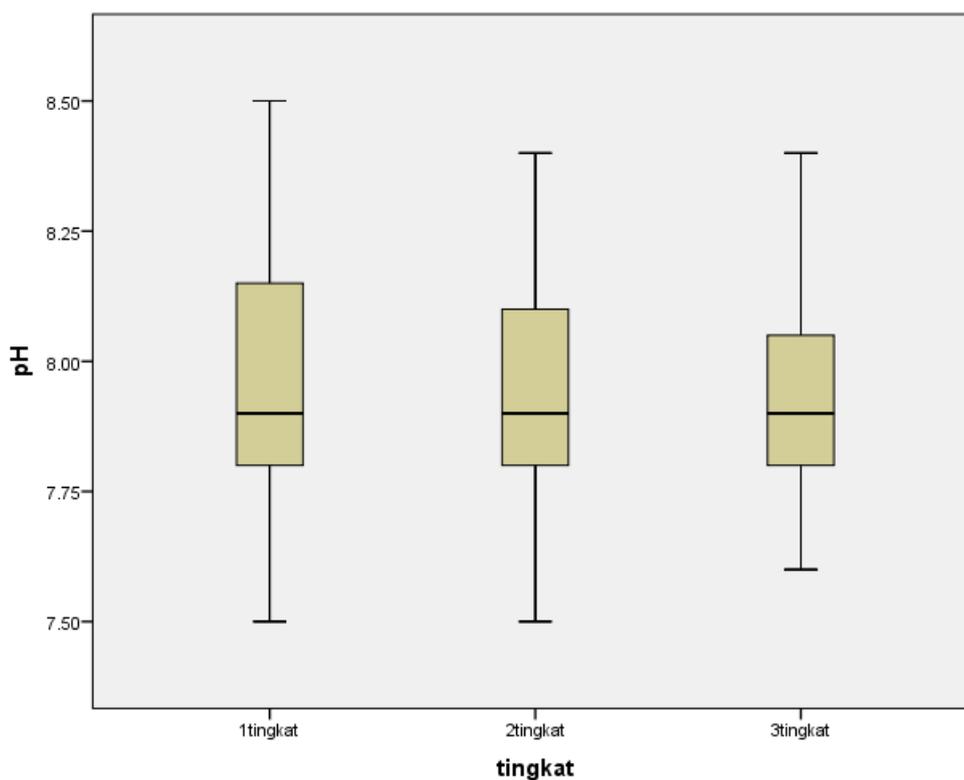
yang >0.05, sehingga tidak terdapat beda nyata antara jumlah tingkat filtrasi pada proses adsorpsi

yang dilakukan terhadap nilai pH hasil adsorpsi. Hal ini dikarenakan nilai pH awal dari sampel sudah berada pada range nilai standar air bersih, sehingga daya jerap bahan isian kurang maksimal. Hal ini dapat disimpulkan bahwa jumlah tingkat adsorpsi belum memberikan perbedaan terhadap hasil pH

hasil adsorpsi air karst, meskipun pada adsorpsi 3 tingkat memiliki standar deviasi dan range hasil paling kecil yang seperti yang ditunjukkan pada *Boxplot* gambar 7, bahwa hasil adsorpsi 3 tingkat cenderung lebih stabil dibandingkan tingkat adsorpsi lainnya.

**Tabel 3.** ANOVA Variabel pH Sampel Air Karst

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.014	2	.007	.163	.850
Within Groups	4.365	105	.042		
Total	4.379	107			



**Gambar 7.** *Boxplot* pH Hasil Adsorpsi pada Sampel Air Karst

#### 4. KESIMPULAN

Pada penelitian ini, berdasarkan hasil analisis TDS dan pH hasil adsorpsi pada sampel air karst, diketahui bahwa tingkat adsorpsi tidak memberikan beda nyata. Namun proses adsorpsi menggunakan kolom adsorpsi portabel tersirkulasi mampu mengurangi kandungan TDS pada air karst dibandingkan sebelum proses. Proses adsorpsi 3 tingkat menjadi pilihan konfigurasi proses paling optimum dibandingkan tingkatan lainnya. Tingkat tersebut dipilih karena diperoleh nilai TDS paling minimum dan nilai pH yang paling stabil dan memenuhi kriteria batas standar air bersih.

Perlu adanya pengembangan dari segi keseragaman pola dan tekanan aliran fluida dan proses pretreatment adsorben yang lebih baik agar hasil adsorpsi dapat lebih baik dan optimal. Penelitian

ini juga dapat dilanjutkan dengan melakukan optimasi untuk kemudian diarahkan ke analisis ekonomi yang dapat memberikan biaya produksi terhadap hasil yang paling minimum.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Institut Pertanian STIPER Yogyakarta sebagai pendukung dana dan kelembagaan pada penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

Bimantio, M. P. (2017). Effect Of Grain Size And Activation Time Of Zeolite To Adsorption And Desorption Of  $Nh_4oh$  And  $Kcl$  As

- Model Of Fertilizer-Zeolite Mix. *Jurnal Konversi*, 6(2), 20–27.
- Bimantio, M. P. (2021). *Patent No. Idd0000059215*. Indonesia: Kementerian Hukum Dan Hak Asasi Manusia.
- Bimantio, M. P., & Ferhat, A. (2021). Portable Circulating Adsorption Column Design For Seawater Purification. *Opsi*, 14(2), 129–135.
- Bimantio, M. P., Oktaviany, H., & Widiasaputra, R. (2020). Perancangan Desain Portable Fixed-Bed Composite Adsorber Column Sebagai Media Pemurnian Biodiesel Dengan Sistem Packing Bed. *Teknik*, 41(3), 253–260. <https://doi.org/10.14710/Teknik.V41n3.32661>
- Ferhat, A., Bimantio, M. P., Nugraha, N. S., Putra, D. P., Seizarsyah, T., Suparyanto, T., ... Pardamean, B. (2021). A Geoelectric Approach For Karst Groundwater Analysis. *International Conference On Eco Engineering Development 2021*, (November). Jakarta: Bina Nusantara University.
- Firmansyah, E., Mawandha, H. G., & Bimantio, M. P. (2020). Pesantren Mandiri Pangan, Program Pelatihan Optimasi Pemanfaatan Lahan Kritis Berbasis Pertanian Terpadu Di Pondok Pesantren Al-Hikmah Gunungkidul. *Jurnal Masyarakat Mandiri*, 4(5), 797–805. <https://doi.org/https://doi.org/10.31764/Jm.m.V4i5.2970>
- Ford, D.C. and Williams, P. (2007) *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley, Chichester, 562. <https://doi.org/10.1002/9781118684986>
- Ford, D. C., & Williams, P. W. (1992). *Karst Geomorphology And Hydrology (P. 305)*. London: London: Chapman & Hall.
- Katherine, & Arie, A. A. (2016). Desain Kolom Adsorpsi Cair Fixed-Bed Untuk Penghilangan Limbah Zat Warna. Universitas Katolik Parahiyangan 2016.
- Katherine, Arenst Andreas Arie, (2016), Desain Kolom Adsorpsi Cair Fixed-Bed Untuk Penghilangan Limbah Zat Warna, Laporan Penelitian, Universitas Katolik Parahiyangan.
- Lutfi, M., Yulianingsih, R., & Muslikha, M. (2018). Desain Dan Pengujian Alat Adsorpsi Limbah Cair Batik Tulis Dengan Variasi Waktu Detensi Dan Komposisi Zeolit Kolom Adsorpsi. *Jurnal Keteknikan Pertanian Tropis Dan Biosistem*, 6(3), 242–250.
- Mc Cabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2018). *Unit operation of chemical engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Mutiari, A., Wiratni, Mindaryani, A., & Surasno. (2013). Desain Adsorber Menggunakan Bahan Isian Resin Penukar Anion Basa Kuat Untuk Pemurnian Biogas. *Jurnal Riset Industri*, 7(2), 101–109.
- Nestmann, F., Oberle, P., Ikhwan, M., & Klingel, P. (2011). Development of underground hydropower systems for karst areas–pilot study Java, Indonesia. *Asian Trans-Disciplinary Karst Conference 2011*, 155.
- Nugraha, M. P. H. (2016). *Kajian Kualitas Air Sungai Bawah Tanah Pada Daerah Imbuhan Dan Daerah Pengolahan Air Goa Bribin, Kabupaten Gunung Kidul, Daerah Istimewa Yogyakarta*. Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta.
- Rambe, S. M., Sipahutar, E. H., & Dina, S. F. (2018). Kajian Perhitungan Desain Kolom Adsorpsi: Studi Kasus Kolom Adsorpsi Gas H<sub>2</sub>S Pada Pembuatan Biogas dari Limbah Pabrik Kelapa Sawit. *Jurnal Teknik Dan Teknologi*, 13(26), 17–24.
- Siswoyo, H., Bisri, M., Taufiq, M., & Pranantya, V. (2019). Karakteristik Hidrokimia Mata Air Karst untuk Irigasi di Kabupaten Tuban. *Jurnal Iptek*, 23(2), 93–100. <https://doi.org/10.31284/j.ipitek.2019.v23i2>
- Sumbada Sulistyorini, I., Edwin, M., & Sampe Arung, A. (2016). Analisis Kualitas Air Pada Sumber Mata Air Di Kecamatan Karanganyar Dan Kaliurang Kabupaten Kutai Timur. *Jurnal Hutan Tropis*, 4(1).