REKAYASA
Journal of Science and Technology
https://journal.trunojoyo.ac.id/rekayasa

Rekayasa, 2025; 18(3): 456-465
ISSN: 0216-9495 (Print)
ISSN: 2502-5325 (Online)

Adsorpsi Fosfat pada Limbah Cair Laundry Skala Rumahan di Kabupaten Jember Menggunakan Karbon Aktif dan Zeolit Teraktivasi

Dinissa Adinda Listifani[1], Noven Pramitasari[1*], Cantika Almas Fildzah[1]
Program Studi Teknik Fakultas Teknik Universitas Jember
Jalan Kalimantan No 37 Kampus Tegalboto Sumbersari Jember 68121 Jawa Timur
*E-mail Korespondensi : novenpramitasari@unej.ac.id
DOI: https://doi.org/10.21107/rekayasa.v18i3.31684
Submitted September 4th 2025, Accepted November 28th 2025, Published December 19th 2025

Abstrak

Limbah cair laundry skala rumahan mengandung fosfat yang menimbulkan risiko lingkungan yang signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas proses adsorpsi menggunakan karbon aktif dan zeolit teraktivasi dalam menurunkan konsentrasi fosfat dari limbah cair laundry skala rumahan. Konsentrasi fosfat awal limbah cair laundry skala rumahan adalah 5,19 mg/L. Proses adsorpsi dilakukan dengan menggunakan rasio massa karbon aktif dan zeolit teraktivasi sebesar 25:75, 50:50, dan 75:25, serta variasi aktivator zeolit menggunakan HCl dan KOH. Prosedur penelitian meliputi pengambilan sampel limbah laundry, pengeringan dan aktivasi zeolit menggunakan larutan HCl 1 M dan KOH 1 M, serta pencampuran adsorben dengan limbah dalam sistem batch selama 60 menit dengan pengadukan konstan. Setelah proses adsorpsi, sampel disaring dan dianalisis konsentrasi fosfat menggunakan metode spektrofotometri. Hasil penelitian menunjukkan konsentrasi fosfat terendah setelah proses adsorpsi dicapai dengan rasio massa karbon aktif dan zeolit yang diaktivasi oleh KOH sebesar 25:75 yaitu sebesar 1,84 mg/L dengan efisiensi penyisihan fosfat sebesar 64,5%. Hasil analisis statistik menggunakan ANOVA dua arah menunjukkan bahwa rasio massa massa karbon aktif dan zeolit teraktivasi secara signifikan mempengaruhi penyisihan fosfat dengan *p*-value sebesar 1,1 × 10^{-6} sedangkan variasi jenis aktivator tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa rasio massa karbon aktif dan zeolit teraktivasi yang tepat dapat menjadi alternatif pengolahan limbah cair laundry skala kecil yang ramah lingkungan dan ekonomis.

Kata Kunci: adsorpsi, karbon aktif, limbah cair laundry, penyisihan fosfat, zeolit

Abstract

Household-scale laundry wastewater contains phosphate, which poses significant environmental risks. This study aims to analyze the effectiveness of the adsorption process using activated carbon and activated zeolite in reducing phosphate concentrations from household laundry wastewater. The initial phosphate concentration in the wastewater was 5.19 mg/L. Adsorption was carried out using mass ratios of activated carbon and zeolite of 25:75, 50:50, and 75:25, as well as variations in zeolite activators using HCl and KOH. The research procedure included collecting laundry wastewater samples, drying and activating zeolite using 1 M HCl and 1 M KOH solutions, and mixing the adsorbents with wastewater in a batch system for 60 minutes under constant stirring. After the adsorption process, samples were filtered and analyzed for phosphate concentration using the spectrophotometric method. The results showed that the lowest phosphate concentration after adsorption was achieved with a mass ratio of activated carbon and zeolite activated by KOH at 25:75, which was 1.84 mg/L, with a phosphate removal efficiency of 64.5%. Statistical analysis using two-way ANOVA indicated that the mass ratio of activated carbon and zeolite significantly affected phosphate removal (p-value = 1.1 × 10^{-6}), while the type of activator did not show a significant effect. This suggests that the appropriate mass ratio of activated carbon and zeolite can be an environmentally friendly and economical alternative for treating small-scale laundry wastewater.

Key words*: adsorption, activated carbon, laundry wastewater, phosphate removal, zeolite*

PENDAHULUAN

Peningkatan jumlah penduduk Indonesia terjadi di setiap tahun. Hal ini dibuktikan oleh Badan Pusat Statistik yang mencatat bahwa populasi penduduk di Indonesia mencapai 275 juta jiwa di tahun 2022. Peningkatan jumlah penduduk di Indonesia mengakibatkan berkembangnya pertumbuhan industri yang pesat. Salah satunya adalah industri pencucian pakaian (*laundry*). Industri pencucian pakaian (*laundry*) adalah salah satu jasa yang kerap dijumpai di berbagai kota di Indonesia, baik industri dalam skala besar maupun kecil. Seiring berubahnya gaya hidup masyarakat di Indonesia dari waktu ke waktu, pengguna jasa pencucian pakaian (*laundry*) juga mengalami peningkatan (Adiastuti *et al*., 2018). Hal ini terjadi karena tidak sedikit masyarakat di Indonesia yang menginginkan keringanan dan kepraktisan dalam mengerjakan pekerjaan rumah, salah satunya seperti mencuci pakaian. Industri pencucian pakaian (*laundry*) biasanya

banyak dibutuhkan oleh industri lain yang bergerak di bidang komersial, perhotelan, hingga rumah sakit. Perlu adanya perhatian lebih terhadap industri pencucian pakaian (*laundry*), karena sejatinya industri ini menjadi salah satu industri penyebab pencemaran lingkungan, khususnya pencemaran air (Fadarina *et al*., 2021).

Kebutuhan air untuk mencuci 1 kg pakaian mencapai 10–15 liter. Industri pencucian pakaian (*laundry*) dalam satu hari dapat menerima 15–30 kg pakaian, sehingga rata – rata debit limbah cair *laundry* yang dihasilkan sebesar 80–100 liter/hari (Zahro, 2022). Besarnya konsumsi air yang digunakan dalam satu siklus pencucian menyebabkan besarnya volume limbah cair yang dihasilkan. Limbah cair *laundry* adalah limbah cair yang dihasilkan dari proses pencucian pakaian maupun produk tekstil lainnya. Limbah cair *laundry* memiliki kandungan berbahaya yang terdiri atas detergen, bahan pemutih, pigmen warna pakaian, hingga kotoran yang menempel pada pakaian. Kandungan – kandungan yang berbahaya ini akan mencemari badan air dan membahayakan ekosistem perairan jika langsung dibuang tanpa ada pengolahan terlebih dahulu (Suharto *et al.,* 2020). Limbah cair *laundry* yang langsung dibuang tanpa adanya pengolahan akan menimbulkan dampak fisik maupun dampak kimiawi pada badan air. Secara fisik, limbah cair *laundry* akan mempengaruhi ekosistem perairan karena meningkatkan *total suspended solid* dan kekeruhan, sedangkan, secara kimiawi, keberadaan senyawa beracun yang kompleks akan mengubah komposisi limbah cair *laundry* karena meningkatkan *chemical oxygen demands* dan pH, serta dapat mengubah karakteristik air bersih.

Air limbah *laundry* mengandung fosfat yang berasal dari penggunaan deterjen pada proses pencucian. Detergen yang digunakan mengandung fosfat dalam bentuk polifosfat. Pada saat proses pencucian, polifosfat akan larut di dalam air membentuk ortofosfat. Ortofosfat adalah komponen monomerik yang terdiri atas $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}, dan PO_4^{3-}. Komponen polimer yang meliputi $(PO_3)6^{3-}$ (heksametafosfat), $P_3O_{10}^{5-}$ (tripolifosfat), dan $P_2O_7^{4-}$ (pirofosfat) adalah komponen polimer yang termasuk ke dalam polifosfat. Zeolit yang digunakan sebagai adsorben, mampu mengikat anion fosfat seperti $H_2PO_4^-$ dan HPO_4^{2-} di dalam air (Nasir & Titah, 2024). Beberapa penelitian menemukan bahwa kadar fosfat yang terkandung dalam air limbah *laundry* mencapai 38,24 mg/L (Kusuma *et al*, 2019) bahkan dalam penelitian yang dilakukan oleh Zahro (2022) menyebutkan bahwa kandungan fosfat dalam air limbah *laundry* mencapai 31,8 mg/L. Mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah kadar fosfat yang diperbolehkan dalam lingkungan adalah 2 mg/L. Kadar fosfat pada air limbah *laundry* yang telah melampaui baku mutu harus disisihkan terlebih dahulu sebelum dibuang ke badan air. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menyisihkan kadar fosfat dalam air limbah *laundry* adalah metode adsorpsi (Agustina *et al.,* 2015).

Metode adsorpsi dipilih untuk menyisihkan kadar fosfat karena memiliki efektivitas dan efisiensi yang tinggi, tidak membutuhkan biaya yang mahal dan prosesnya yang mudah. Metode adsorpsi menggunakan adsorben sebagai material penyerap polutan, beberapa adsorben yang banyak digunakan adalah karbon aktif dan zeolit alam. Karbon aktif memiliki kemampuan daya adsorpsi mencapai 25 – 100% untuk menyerap senyawa organik maupun anorganik (Ultama et al., 2021). Adapun zeolit alam memiliki ciri fisik permukaan yang luas dan berpori sehingga mampu menyerap kadar fosfat dalam air limbah. Zeolit alam secara alamiah terbentuk dari perubahan kaca vulkanik di bawah berbagai kondisi geokimia dan variasi suhu. Tetrahedra (TO_4) adalah komponen penyusun zeolit yang menciptakan struktur kerangka tiga dimensi, dimana ikatan oksigen berada di puncaknya dengan SiO_4 dan AlO_4 sebagai kerangka penghubung (Ultama et al. (2021) dan Abdelwahab & Thabet. (2023)). Pori-pori zeolit yang merupakan sisi aktif memiliki ikatan ikatan hidroksil –OH. Sisi aktif ini berperan dalam penting dapat proses penyisihan polutan, sehingga semakin banyak sisi aktif maka semakin efektif proses adsorpsi yang terjadi.

Beberapa sisi aktif zeolit yang terletak pada pori – pori zeolit masih tertutup oleh adanya pengotor yang menempel pada permukaannya. Pengotor pada zeolit, terlebih pada zeolit alam, biasanya berupa unsur – unsur seperti Na, K, Ca, Mg, dan Fe. Maka dari itu, diperlukan proses aktivasi terhadap zeolit sebelum digunakan sebagai adsorben untuk meningkatkan daya serapnya (Side et al. (2023) dan Aprilianti et al. (2023)). Pentingnya proses aktivasi ini menjadi salah satu latar belakang dari penelitian ini sehingga dapat diketahui efektivitas penggunaan karbon aktif dan zeolit yang diaktivasi dengan aktivator berbeda sebagai adsorben dalam untuk menyisihkan fosfat pada air limbah laundry. Selain itu, penelitian ini juga

menganalisis pengaruh perbandingan komposisi persentase massa adsorben dan jenis aktivator zeolit terhadap penyisihan kadar fosfat pada air limbah laundry.

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Remediasi dan Monitoring Kualitas Air, Fakultas Teknik, Universitas Jember dan berlangsung selama tiga bulan sejak bulan Maret hingga Juni 2024. Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi lumpang kayu, ayakan mesh ukuran 200, timbangan analitik, kertas saring, oven, *magnetic stirrer,* dan spektrofotometer Uv-Vis. Sementara bahan yang digunakan meliputi adsorben berupa karbon aktif dan zeolit, KOH 1M, HCl 1M, aquades, serta sampel air limbah laundry yang diambil dari salah satu usaha laundry perumahan X, berlokasi di Kecamatan Sumbersari, Kabupaten Jember.

Persiapan Adsorben

Karbon aktif kerap dipilih untuk proses adsorpsi karena daya adsorpsinya yang tinggi serta mampu mengadsorpsi berbagai senyawa, baik organik maupun anorganik, termasuk senyawa fosfat (Sailah *et al*, 2020). Karbon aktif yang digunakan sebagai adsorben dalam penelitian ini berasal dari tempurung kelapa. Kadar karbon yang cukup tinggi dimiliki oleh tempurung kelapa, sehingga cukup baik digunakan sebagai bahan pembuatan karbon aktif. Tempurung kelapa yang telah menjadi karbon aktif akan digerus sehingga menjadi partikel yang lebih kecil, kemudian karbon aktif diayak untuk menyamakan ukuran partikel satu sama lain. Karbon aktif dan zeolit akan diayak menggunakan ayakan 200 mesh. Pemilihan ukuran partikel adsorben sebesar 200 mesh dipilih karena berdasarkan penelitian Ardian *et al* (2022), zeolit yang memiliki ukuran partikel 200 mesh memiliki nilai porositas sebesar 26,40% dan daya serap sebesar 65,25%, sedangkan zeolit dengan ukuran partikel 100 mesh memiliki nilai porositas sebesar 24,36% dan daya serap air sebesar 60,60%. Hal ini menunjukkan bahwa porositas dan daya serap air oleh zeolit akan semakin meningkat jika ukuran partikel zeolit semakin halus atau semakin kecil.

Aktivasi Zeolit

Zeolit sebanyak 100 gram dilarutkan ke dalam larutan HCl dan larutan KOH. Larutan yang digunakan masing-masing sebanyak 100 ml dengan konsentrasi 1 M. Aktivasi terhadap zeolit diperlukan untuk melarutkan Al_2O_3 yang terkandung didalamnya sehingga meningkatkan gugus Si-OH pada permukannya. Selain itu, aktivasi terhadap zeolit berguna untuk memperluas permukaan zeolit karena garam-garam mineral seperti Ca+, K+, Mg+ dan Na+ akan larut akibat asam (Zilfa *et al,* 2020). Zeolit kemudian direndam selama 4 jam untuk proses homogenisasi larutan terhadap zeolit, kemudian dinetralkan dengan cara pencucian menggunakan akuades hingga pH zeolit sama dengan pH awal sebelum diaktivasi. Pencucian pada zeolit berfungsi untuk menghilangkan ion-ion pengotor (Faisal *et al,* 2015). Zeolit setelah penetralan dikeringkan menggunakan oven selama 2 jam dengan temperatur 110°C untuk menguapkan kadar air sisa penetralan.

Proses Adsorpsi

Proses adsorpsi yang digunakan adalah adsorpsi dengan metode *batch*. Proses adsorpsi dengan metode *batch* dilakukan dengan pencampuran adsorben dengan fluida yang jumlahnya tetap untuk diamati perubahan kualitasnya dalam rentang waktu tertentu (Sahania *et al,* 2024). Proses adsorpsi dilakukan untuk menentukan efektivitas serta pengaruh adsorben dalam menurunkan kadar fosfat. Proses adsorpsi dilakukan pada waktu kontak selama 60 menit dan kecepatan pengadukan 450 rpm. Penentuan waktu kontak dan kecepatan pengadukan ini didasarkan pada penelitian serupa yang dilakukan oleh (Utomo *et al.,* 2018), dimana perolehan konsentrasi fosfat akhir mencapai 0,000 ppm hingga tidak terdeteksi, dengan waktu kontak adsorpsi selama 75 menit dan kecepatan pengadukan 400 rpm.

Perhitungan Efisiensi Penyisihan

Efisiensi penyisihan kadar fosfat dihitung menggunakan data kadar fosfat awal dan kadar fosfat akhir sehingga menghasilkan data persentase efisiensi penyisihan. Persamaan untuk menentukan efisiensi penyisihan disajikan pada Persamaan (1).

$$\% \text{ Efisiensi Penyisihan} = \frac{Co - Ce}{Co} \times 100\% \quad \text{.....(1)}$$

Keterangan :

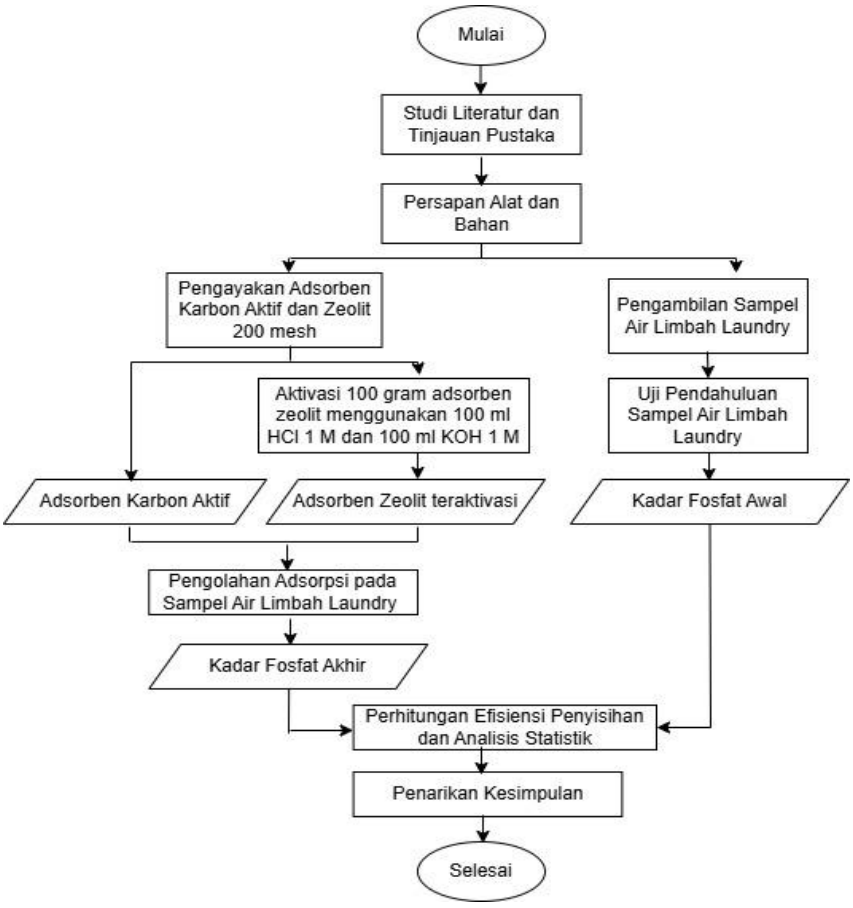
Co = Kadar fosfat awal (mg/L)

Ce = Kadar fosfat akhir (mg/L)

Analisis Statistik

Pengaruh perbandingan komposisi persentase massa adsorben dan jenis aktivator zeolit terhadap penyisihan kadar fosfat pada air limbah laundry dianalisis menggunakan Analysis of Variance (ANOVA) dua arah. ANOVA dua arah digunakan untuk membandingkan perbedaan rata – rata antara dua variabel bebas (yang memiliki tiga atau lebih variasi) dengan satu variabel terikat (Okoye & Hosseini, 2024).

Variabel independen atau variabel bebas dalam penelitian ini terdiri dari komposisi persentase perbandingan massa dan jenis aktivator yang digunakan. Perbandingan komposisi persentase massa adsorben (Karbon Aktif : Zeolit) memiliki tiga variasi perbandingan persentase massa adsorben yakni sebesar 25:75, 50:50, dan 75:25, serta jenis aktivator zeolit yaitu HCl dan KOH yang masing-masing memiliki konsentrasi 1 M. Sedangkan, variabel dependen atau variabel terikat dalam penelitian ini berupa kadar fosfat akhir yang dihasilkan setelah proses adsorpsi. Hipotesis yang diajukan adalah H_0 dan H_1, dimana H_0 menunjukkan tidak adanya pengaruh signifikan antara perbandingan massa adsorben dan jenis aktivator terhadap penyisihan kadar fosfat, sedangkan H_1 menunjukkan adanya pengaruh signifikan antara perbandingan massa dan jenis aktivator terhadap penyisihan kadar fosfat. Prosedur penelitian ini dapat dilihat pada diagram alir penelitian yang disajikan di Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

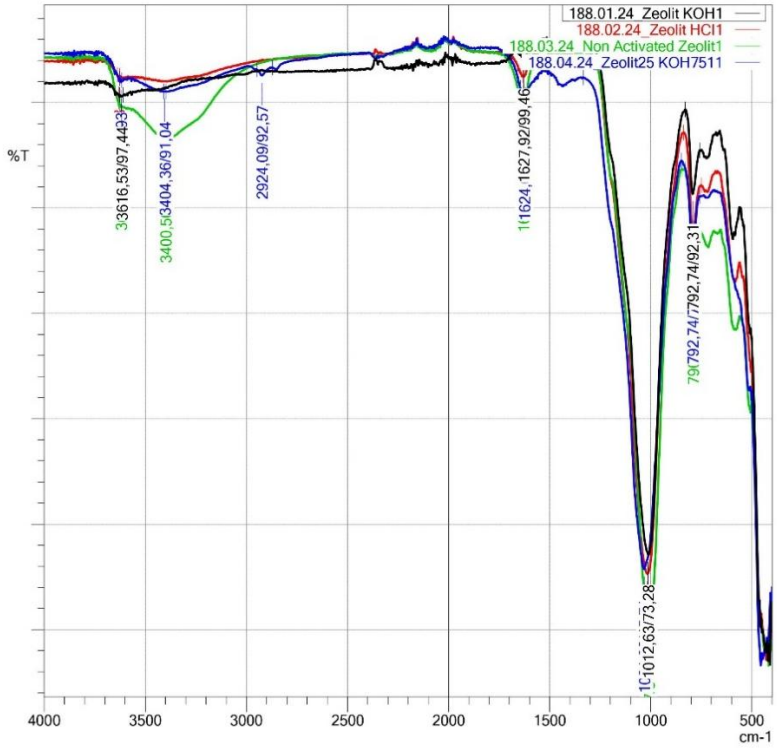
Karakteristik awal limbah cair *laundry* sebelum diolah perlu dianalisis untuk mengetahui apa saja kandungan bahan pencemar di dalamnya yang menimbulkan dampak secara signifikan terhadap lingkungan. Limbah cair *laundry* yang diambil dari usaha *laundry* X memiliki karakteristik fisik limbah cair yang berwarna kelabu dan sedikit berbusa. Parameter lain terkait karakteristik awal limbah *laundry* adalah kadar fosfat. Karakteristik awal limbah cair *laundry* disajikan dalam Tabel 1. Baku mutu limbah cair *laundry* mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Limbah cair.

Tabel 1. Karakteristik Awal Limbah Laundry

Parameter	Hasil	Baku Mutu
Fosfat	5,19 mg/L	2 mg/L

Karakterisasi Adsorben

Hasil interpretasi spektra FTIR pada adsorben yang digunakan dalam proses adsorpsi menunjukkan bahwa pada zeolit yang tidak teraktivasi dan zeolit yang teraktivasi KOH setelah adsorpsi memiliki ikatan ulur O–H pada bilangan gelombang 3400,50 cm^{-1}dan 3404,36 cm^{-1}, namun zeolit yang telah teraktivasi oleh HCl dan KOH sebelum digunakan untuk adsorpsi tidak memiliki serapan pada bilangan gelombang tersebut. Hal ini terjadi karena setelah proses aktivasi pada zeolit terdapat proses penetralan menggunakan *aquadest*, dimana sesudah proses penetralan dilakukan pemanasan menggunakan suhu tinggi, sehingga terjadi degradasi pada ikatan ulur O–H (Robbika, 2022).



Gambar 2. Hasil Uji FTIR

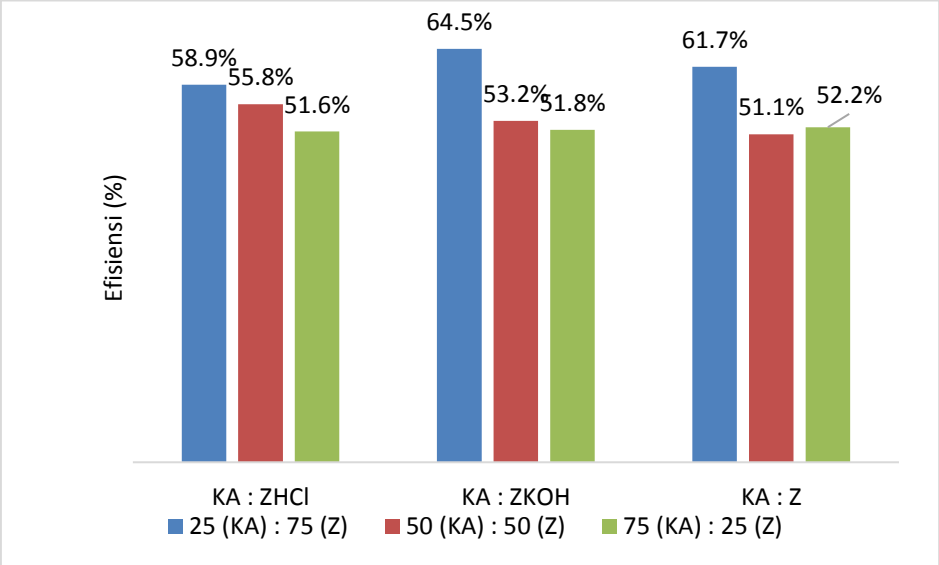
Zeolit teraktivasi HCl (Gambar 2) memiliki serapan vibrasi ulur asimetri Si–O/Al–O bilangan gelombang 1016,49 cm^{-1}, dimana bilangan gelombang ini mengalami kenaikan jika dibandingkan dengan zeolit yang tidak teraktivasi dengan bilangan gelombang 1008,77 cm-1. Kenaikan tersebut terjadi karena pemberian perlakuan asam pada zeolit yang menyebabkan dealuminasi atau berkurangnya ikatan Al–O pada kerangka zeolit. Perlakuan asam menyebabkan ikatan Si–O yang lebih mudah terurai dibandingkan ikatan Al–O. Hal ini dibuktikan berdasarkan harga energi disosiasi ikatan yang dimiliki oleh ikatan Al–O (116 kkal/mol) yang lebih rendah daripada ikatan Si–O (190 kkal/mol) (Anghistra et al., 2023). Zeolit KOH yang

sudah digunakan dalam proses adsorpsi memiliki serapan pada bilangan gelombang 2924,09 cm^{-1} dan 1410,00 cm^{-1} yang menunjukkan adanya vibrasi ulur dan vibrasi tekuk C–H, dimana kemunculannya disebabkan karena tercampurnya karbon aktif dengan zeolit sebagai adsorben.

Efektivitas Proses Adsorpsi terhadap Penyisihan Kadar Fosfat

Hasil analisis pada kadar fosfat akhir berdasarkan perbandingan massa adsorben dapat disimpulkan bahwa, kadar fosfat akhir yang paling rendah didapatkan oleh sampel yang diberi penambahan adsorben zeolit teraktivasi lebih banyak daripada penambahan adsorben karbon aktif. Perolehan ini sesuai dengan penelitian serupa yang dilakukan oleh Pungut *et al* (2021), dimana penurunan kadar fosfat menggunakan karbon aktif dan zeolit sebagai media filtrasi dengan variasi ketinggian media 40 cm dan 60 cm. Penelitian tersebut menghasilkan efisiensi penyisihan sebesar 96,44% dengan kadar fosfat akhir 0,64 mg/L. Perolehan ini didapat oleh sampel yang diberi perlakuan variasi ketinggian media karbon aktif 40 cm dan zeolit 60 cm, sehingga penurunan kadar fosfat lebih efektif diturunkan oleh zeolit sebagai adsorben, meskipun karbon aktif juga mampu menurunkan kadar fosfat.

Efisiensi kadar fosfat pada sampel dengan penambahan zeolit sebesar 0,5 g; 1 g; dan 1,5 g berturut-turut sebesar 52,1%; 51,15%; dan 69,82%. Gambar 1 menunjukkan fluktuasi dari efisiensi penyisihan dalam persentase yang dihitung berdasarkan perolehan kadar fosfat awal dan kadar fosfat akhir dari sampel limbah cair *laundry*. Dari grafik tersebut, dapat disimpulkan bahwa efisiensi penyisihan kadar fosfat tertinggi, yaitu sebesar 64,5%, dicapai oleh sampel yang menggunakan adsorben zeolit teraktivasi KOH, sedangkan, efisiensi penyisihan kadar fosfat terendah, yaitu sebesar 51,1%, dicapai oleh sampel yang menggunakan adsorben zeolit tidak teraktivasi. Efisiensi penyisihan kadar fosfat paling tinggi didapat oleh sampel dengan penambahan adsorben zeolit teraktivasi basa oleh KOH dibandingkan dengan zeolit yang tidak teraktivasi. Perolehan persentase efisiensi kadar fosfat pada penelitian ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Diyanah *et al* (2019), dimana penyisihan amonium oleh zeolit teraktivasi KOH 1 M memiliki persentase penyisihan sebesar 58,7%, sedangkan penyisihan amonium oleh zeolit tidak teraktivasi memiliki persentase penyisihan yang lebih rendah, yakni sebesar 41,3%. Hasil tersebut membuktikan bahwa aktivasi yang dilakukan pada zeolit sebelum adsorpsi mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi untuk menyisihkan polutan.



Gambar 3. Grafik efisiensi penyisihan kadar fosfat

Gambar 3 menjelaskan bahwa perolehan kadar fosfat akhir paling rendah disebabkan karena penambahan massa zeolit yang lebih banyak daripada massa karbon aktif dengan komposisi persentase perbandingan massa karbon aktif dan zeolit sebagai adsorben berturut – turut sebesar 25:75. Penambahan adsorben yang sesuai dengan dosisnya tidak memungkinkan terjadinya desorpsi. Hal ini dapat disimpulkan bahwa dengan adanya penambahan zeolit dengan komposisi yang lebih banyak daripada karbon aktif,

maka sisi aktif yang terdapat pada permukaan zeolit juga semakin banyak, sehingga kemampuan penyerapan fosfat sebagai adsorbat oleh zeolit sebagai adsorben juga bertambah, dimana hal ini menyebabkan berkurangnya kadar fosfat pada sampel limbah cair laundry (Nasir & Titah, 2024).

Penggunaan zeolit teraktivasi sebagai adsorben pada proses adsorpsi juga memiliki kemampuan untuk menyisihkan kadar fosfat pada limbah cair laundry. Berdasarkan Gambar 2 yang memuat data perolehan kadar fosfat akhir, ditunjukkan bahwa sampel limbah cair laundry yang diberi penambahan variasi jenis aktivator adsorben zeolit teraktivasi KOH memiliki kadar fosfat akhir yang paling rendah jika dibandingkan dengan sampel limbah cair laundry yang diberi penambahan variasi jenis aktivator adsorben zeolit teraktivasi HCl dan zeolit tidak teraktivasi. Menurut variasi jenis aktivatornya, sampel limbah cair laundry yang ditambahkan zeolit teraktivasi HCl memiliki kadar fosfat akhir paling rendah sebesar 2,13 mg/L. Sampel limbah cair laundry yang ditambahkan adsorben zeolit teraktivasi KOH memiliki kadar fosfat akhir paling rendah sebesar 1,84 mg/L. Sampel limbah cair laundry dengan variasi jenis aktivator zeolit tidak teraktivasi memiliki kadar fosfat akhir paling rendah sebesar 1,99 mg/L. Aktivasi yang dilakukan terhadap zeolit alam berfungsi untuk meningkatkan kapasitas, selektivitas, dan aksesibilitas adsorpsi, memperbaiki tekstur (ukuran pori – pori dan area permukaan), memproduksi mesoporositas dan menambah kandungan mineral aluminium (Al), serta meningkatkan sifat asamnya. Maka dari itu, sampel yang diberi perlakuan penambahan adsorben zeolit yang teraktivasi memiliki efisiensi penyisihan kadar fosfat yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan sampel yang diberi penambahan oleh adsorben zeolit tidak teraktivasi. Terlebih jika zeolit alam tersebut diaktivasi menggunakan aktivator basa, contohnya menggunakan KOH. Penggunaan aktivator basa pada zeolit mampu melarutkan mineral silika (Si) yang terkandung di dalamnya (Senila & Cadar, 2024).

Zeolit alam yang diaktivasi atau diberi perlakuan asam, tepatnya menggunakan larutan HCl, akan menyebabkan proses terjadinya dealuminasi zeolit atau runtuhnya struktur kristal zeolit. Unsur Al sebagai kerangka zeolit dapat terlepas akibat proses aktivasi, sehingga menyebabkan terbentuknya $AlCl_3$ dari sebagian unsur Al, sedangkan sisa unsur Al akan membentuk senyawa aluminum hidroksilat ($Al(OH)_3$) dan tektosilikat ($Si(OH)_4$) yang dapat membentuk fasa kristalin baru (Bani, 2023). Limbah cair laundry mengandung ion fosfat (PO_4^{3-}) yang dapat tereduksi pada proses adsorpsi menjadi sebuah flok karena diikat oleh ($Al(OH)_3$) yang bertindak sebagai koagulan (Samadikun et al., 2021). Zeolit yang diaktivasi secara basa akan menghasilkan zeolit yang memiliki sifat lebih polar, jika dibandingkan dengan zeolit yang diaktivasi secara asam. Aktivasi zeolit secara asam dapat menyebabkan berkurangnya kemampuan adsorpsi yang diakibatkan oleh zeolit yang menjadi hidrofob. Daya adsorpsi zeolit terhadap uap air akan berkurang jika konsentrasi larutan asam yang digunakan pada saat proses aktivasi zeolit terlalu tinggi (Ulfa dan Samik, 2022).

Zeolit teraktivasi KOH sebagai adsorben memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menyisihkan kadar fosfat jika dibandingkan dengan zeolit teraktivasi HCl dan zeolit yang tidak teraktivasi. Perolehan kadar fosfat akhir paling rendah sebesar 1,84 mg/L berdasarkan jenis aktivatornya didapatkan pada sampel yang diberi penambahan adsorben zeolit teraktivasi basa oleh KOH, daripada zeolit teraktivasi HCl sebesar 2,13 mg/L dan zeolit tidak teraktivasi 1,99 mg/L. Hasil penyisihan kadar fosfat setelah adsorpsi ini sejalan dengan penelitian serupa untuk menyisihkan polutan menggunakan zeolit teraktivasi sebagai adsorben yang dilakukan oleh Dignos et al (2019), proses penyisihan Cu pada sebuah sampel limbah cair dengan adsorpsi menggunakan zeolit alam teraktivasi basa memiliki kemampuan menyisihkan Cu lebih baik jika dibandingkan dengan zeolit alam yang teraktivasi oleh larutan asam asetat 1 M dengan kondisi perlakuan yang sama. Berdasarkan Alvarez et al (2021) penyisihan Cr(IV) pada sebuah sampel limbah cair lebih tinggi ketika menggunakan zeolit alam teraktivasi NaOH dengan persentase penyisihan sebesar 16% jika dibandingkan dengan sampel yang menggunakan zeolit alam teraktivasi HCl dengan persentase penyisihan (10%).

Pengaruh Perbandingan Massa Adsorben dan Jenis Aktivator

Analisis statistik diperlukan dalam penelitian ini untuk menganalisis pengaruh dari variabel penelitian terhadap sampel penelitian. Analisis data dalam penelitian ini menggunakan perangkat lunak R Studio. Uji normalitas dan uji homogenitas harus dilakukan terlebih dahulu karena menjadi asumsi prasyarat, dimana populasi dalam penelitian harus terdistribusi normal serta memiliki varians yang homogen, untuk

menggunakan metode analisis statistik Two-Way ANOVA. Uji normalitas digunakan untuk menentukan apakah sebaran data terdistribusi normal. Ada banyak metode yang dapat digunakan untuk menguji normalitas suatu data, maka dari itu, setiap metode pengujian pasti memiliki hasil yang berbeda. Uji normalitas pada penelitian ini menggunakan metode Shapiro-Wilk. Metode Shapiro-Wilk dipilih karena cocok digunakan untuk jumlah sampel <50. Data disebut terdistribusi normal ketika hipotesis nol (H0) diterima, dimana p-value > 0,05 (Mishra et al., 2019).

Hasil uji normalitas pada penelitian ini menunjukkan *p–value* = 0,305 > 0,05 untuk residual data efisiensi penyisihan kadar fosfat. Dari hasil tersebut maka, data diartikan telah terdistribusi secara normal. Hasil uji homogenitas pada penelitian ini menunjukkan *p-value* = 0,1187 > 0,05 untuk pengujian pada data efisiensi penyisihan kadar fosfat sehingga dapat disimpulkan bahwa data tersebut homogen atau berasal dari populasi yang memiliki variasi yang sama. Hasil analisis pengaruh perbandingan massa adsorben dan jenis aktivator terhadap penyisihan kadar fosfat menggunakan uji ANOVA disajikan ke dalam Tabel 2.

Tabel 2. Hasil uji Two-ways ANOVA terhadap penyisihan kadar fosfat

Variabel	p-value	Keterangan
Perbandingan Massa	$1{,}1 \times 10^{-6}$	Terdapat signifikansi***
Jenis Aktivator	0,451	Tidak terdapat signifikansi

Berdasarkan dari pengujian statistik menggunakan analisis varians dapat disimpulkan bahwa perbandingan massa adsorben memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penyisihan kadar fosfat. Hal ini ditunjukkan dengan nilai *p-value* atau nilai probabilitas signifikasi penyisihan kadar fosfat terhadap perbandingan massa sebesar $1{,}1 \times 10^{-6}$ yang mana nilai ini lebih kecil dari pada nilai signifikansi sebesar 0,05 maka H_0 ditolak. Sedangkan, jenis aktivator tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penyisihan kadar fosfat karena nilai *p-value* yang dihasilkan sebesar 0,451, dimana nilai ini lebih besar dari pada nilai signifikansi yakni 0,05 maka H_0 diterima.

Efisiensi penyisihan kadar fosfat paling tinggi dalam penelitian ini diperoleh pada limbah *laundry* yang diadsorpsi dengan persentase perbandingan massa karbon aktif dan zeolit sebesar 25:75. Hal ini menunjukkan bahwa perbandingan massa adsorben memiliki signifikasi terhadap penyisihan kadar fosfat dalam limbah *laundry* selaras dengan penelitian lain yang dilakukan oleh Pungut (2021). Penelitian tersebut menghasilkan persentase efisiensi penyisihan kadar fosfat pada limbah *laundry* yang paling tinggi adalah proses adsorpsi menggunakan media zeolit yang disusun pada sebuah rangkaian reaktor dengan ketinggian media 60 cm. Efisiensi penyisihan kadar fosfatnya mencapai 96,44%, sedangkan pada penelitian yang dilakukan oleh Wirosoedarmo et al (2019) menyimpulkan bahwa variansi massa adsorben tidak berpengaruh secara signifikan berdasarkan uji ANOVA. Efisiensi penyisihan kadar fosfat pada limbah laundry yang paling tinggi sebesar 71,93%. Nilai tersebut diperoleh pada sampel yang diberikan perlakuan penambahan massa zeolit termodifikasi sebesar 1 gram, dengan variasi massa zeolit termodifikasinya adalah 0,5 g, 1 g, dan 1,5 g. Hal ini dapat disebabkan karena adsorben jika ditambahkan dalam dosis yang tinggi akan memiliki perbedaan jumlah gugus-gugus aktif yang mampu menyerap adsorbat sehingga kadar polutan atau zat yang dapat diadsorpsi semakin menurun.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian dan analisis statistik yang sudah dilakukan, didapatkan kesimpulan bahwa proses adsorpsi menggunakan karbon aktif tempurung kelapa dan zeolit teraktivasi KOH sebagai adsorben dengan komposisi persentase perbandingan massa 25:75 efektif menyisihkan kadar fosfat dalam limbah cair laundry hingga diperoleh kadar fosfat akhir 1,84 mg/L, dengan efisiensi penyisihan fosfat mencapai 64,5%. Selain itu, diperoleh bahwa perbandingan komposisi persentase massa adsorben memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penyisihan kadar fosfat yang dibuktikan dengan analisis statistik menggunakan metode Two-Ways ANOVA, dimana nilai *p-value* = $1{,}1 \times 10^{-6}$ < 0,05, sedangkan jenis aktivator tidak memiliki pengaruh signifikan terhadap penyisihan kadar fosfat yang dibuktikan dengan nilai *p-value* = 0,451 > 0,05.

DAFTAR PUSTAKA

Abdelwahab, O., & Thabet, W. M. (2023). Natural zeolites and zeolite composites for heavy metal removal from contaminated water and their applications in aquaculture Systems: A review. *Egyptian Journal of Aquatic Research/Egyptian Journal of Aquatic Research*, 49(4), 431–443.

Adiastuti, F. E., & Afany, M. R. (2020). Kajian Pengolahan Air Limbah Laundry Dengan Metode Adsorpsi Karbon Aktif Serta Pengaruhnya Terhadap Pertumbuhan Azolla. *Jurnal Tanah Dan Air (Soil and Water Journal)*, 15(1), 38–46.

Agustina, T. E., Luigi, C., & Lorenza, T. (2016). Pengaruh Ketinggian Unggun Zeolit Dan Suhu Aktivasi Zeolit Terhadap Penurunan Konsentrasi Fosfat Pada Air Limbah Laundry Sintetik. *Jurnal Teknik Kimia*, 21(1), 39–45.

Álvarez, A. M., Guerrón, D. B., & Calderón, C. M. (2021). Natural zeolite as a chromium VI removal agent in tannery effluents. Heliyon, 7(9), e07974. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07974

Anghistra, P., Ditya, Pardoyo, & Subagio, A. (2023). Modifikasi zeolit alam dengan MN pada pengaruh asam dan high energy milling. *Greensphere: Journal of Environmental Chemistry*, 3(2), 1–5.

Aprilianti, W., Wahyuni, N. & Zaharah, T. A., (2023). Adsorpsi ion besi pada lindi menggunakan zeolit alam teraktivasi asam klorida (HCl). *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 11(2), 571.

Ardian, D., Muuhammad., Sartika, Z. (2022). Pemanfaatan Zeolit Alam Sebagai Adsorben Dalam Pemurnian Ethanol Dengan Methode Destilasi Adsorpsi. *Jurnal TEKSAGRO*, 3(1), 1-6

Bani, G. A. (2023). Pengaruh katalis zeolit alam ende terhadap kecepatan aduk dan waktu optimum dalam esterifikasi biodiesel dari minyak nyamplung. *Dalton Jurnal Pendidikan Kimia Dan Ilmu Kimia*, 6(3), 177.

Dignos, E & Gabejan, K & Olegario, Eleanor & Mendoza, H. (2019). The comparison of the alkali-treated and acid-treated naturally mined Philippine zeolite for adsorption of heavy metals in highly polluted waters. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 478. 012030. 10.1088/1757-899X/478/1/012030.

Diyanah, A., Bahri, S., Nuryoto, N., & Kurniawan, T. (2019). Modifikasi zeolit alam bayah dengan basa untuk aplikasi eliminasi amonium di dalam kolam bandeng. *Jurnal Integrasi Proses/Jurnal Integrasi Proses*, 8(2), 57.

Fadarina, Purnama Sari, I., Rasi Harahap, H. (2021). Pengolahan Air Buangan Limbah Laundry Menggunakan Bottom Ash Sebagai Media Adsorpsi Laundry Waste Water Treatment Using Bottom Ash As Adsorption Media. *Jurnal Kinetika*, 12(02), 21–28.

Faisal, M., Suhartana, S., & Pardoyo, P. (2015). Zeolit Alam Termodifikasi Logam Fe sebagai Adsorben Fosfat (PO43-) pada Air Limbah. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi/Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 18(3), 91–95.

Kusuma, D. A., Fitria, L., & Kadaria, U. (2019). Pengolahan Limbah Laundry Dengan Metode Moving Bed Biofilm Reactor (Mbbr) (Laundry Wastewater Treatment Using Moving Bed Biofilm Reactor (Mbbr) Method). *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 7(1), 001.

Mishra, P., Pandey, C. M., Singh, U., Gupta, A., Sahu, C., & Keshri, A. (2019). Descriptive statistics and normality tests for statistical data. *Annals of Cardiac Anaesthesia/Annals of Cardiac Anaesthesia*, 22(1), 67.

Nasir, F. N. & Titah, H. S. (2024). The use of granular activated carbon and zeolite as an adsorbent to reduce the concentration of phosphate, chemical oxygen demand and total suspended solid in laundry wastewater. *Journal of Ecological Engineering*, 25(4), 170–183.

Okoye, K., & Hosseini, S. (2024). Analysis of variance (ANOVA) in R: one-way and two-way ANOVA. In R Programming: Statistical Data Analysis in Research (pp. 187-209). Singapore: Springer Nature Singapore

Pungut, P., Kholif, M. A., & Pratiwi, W. D. I. (2021). Penurunan Kadar Chemical Oxygen Demand (Cod) Dan Fosfat Pada Limbah Laundry Dengan Metode Adsorpsi. *Jurnal Sains Dan Teknologi Lingkungan*, 13(2), 1-8.

Robbika, N. F. (2022). Sintesis karbon aktif dari ampas tebu dengan aktivasi kimia menggunakan koh sebagai adsorben logam berat cr-vi. *Berkala Penelitian Teknologi Kulit, Sepatu Dan Produk Kulit*, 21(1), 24–33.

Sailah, I., Mulyaningsih, F., Ismayana, A., Puspaningrum, T., Adnan, A. A., Indrasti, N. S. (2020). Kinerja karbon aktif dari kulit singkong dalam menurunkan konsentrasi fosfat pada air limbah laundry. Jurnal Teknologi Industri Pertanian, 30(2), 180-189. https://doi.org/10.24961/j.tek.ind.pert.2020.30.2.180

Sahania, R. R., Utubira, Y., Manuhutu, J. B., (2024). Efisiensi dan kapasitas adsorpsi karbon aktif dari kulit jagung dalam menurunkan kadar logam fe. *Molluca Journal of Chemistry Education (MJoCE)*, 14(1), 60-69.

Samadikun, B. P., Oktiawan, W., Junaidi, Rais, A. K., Taqiyya, T. A., Amrullah, M. R., & Basyar, C. (2021). Effect of electrode configuration and voltage variations on electrocoagulation process in phosphate removal of laundry wastewater. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 896(1), Article 012025. https://doi.org/10.1088/1755-1315/896/1/012025

Senila, M., & Cadar, O. (2024). Modification of natural zeolites and their applications for heavy metal removal from polluted environments: Challenges, recent advances, and perspectives. *Heliyon*, 10(3), e25303.

Side, S., Putri, S. E., Pratiwi, D. E., Rahma, A., & Rahman, A. (2023). The effect of acid treatment on the characteristics of modernite zeolite. *Sainsmat : Jurnal Ilmiah Ilmu Pengetahuan Alam/Sainsmat*, 12(2), 114.

Suharto, B., Anugroho, F., & Putri, F. (2020). Penurunan Kadar Fosfat Air Limbah Laundry Menggunakan Kolom Adsorpsi Media Granular Activated Carbon (GAC). *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 7(1), 36-46. doi:http://dx.doi.org/10.21776/ub.jsal.2020.007.01.5

Ulfa, S. N. S., & Samik, S. (2023). Artikel review: pemanfaatan katalis zeolit alam teraktivasi dalam sintesis biodiesel dengan metode esterifikasi dan transesterifikasi. *Unesa Journal of Chemistry*, 11(3), 165–181.

Ultama, A. V. P., (2021). Penyerapan Fosfat Limbah Cair Laundry Dengan Metode Adsorpsi. *AMINA*, 3 (3), 88 – 95.

Utomo, W. P., Nugraheni, Z. V., Rosyidah, A., Shafwah, O. M., Naashihah, L. K., Nurfitria, N., & Ullfindrayani, I. F. (2018). Penurunan Kadar Surfaktan Anionik dan Fosfat dalam Air Limbah Laundry di Kawasan Keputih, Surabaya menggunakan Karbon Aktif. *Akta Kimia Indonesia: The Official Journal of the Indonesian Chemical Society*, 3(1), 127.

Wirosoedarmo, R., Kurniati, E., & Ardika, A. (2019). Adsorpsi Senyawa Fosfat Total (PO4) dalam Air Buangan Laundry dengan Zeolit Termodifikasi. Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan, 5(2), 35-42. doi:http://dx.doi.org/10.21776/ub.jsal.2018.005.02.5

Zahro, S.F, Setyowati, Rr. D. N., Nengse S., Utama, T. T., Pribadi, A. (2022). Pengolahan limbah cair laundry menggunakan kombinasi media pasir silika-karbon aktif-manganese greensand. *Dampak: Jurnal Teknik Lingkungan Universitas Andalas.* 19(1), 8-16.

Zilfa, Z., Septiani, U., & Mirawati, M. (2020). Pengaruh HCl terhadap Aktifasi Zeolit Alam Clipnotilolit-Ca Pada Penyerapan Pb(II). *Jurnal Riset Kimia*, 11(2), 80–88. https://doi.org/10.25077/jrk.v11i2.355