

Studi Regenerasi Silika Gel Biru dan Putih sebagai Adsorben Etanol-Air untuk Mendukung Pengembangan Biofuel di Industri Polimer dan Otomotif

Muhammad Fadhillah Ansyari^{1,*)}, Fitria Ika Aryanti²⁾, Tasya Salsabila³⁾

^{1,2}Politeknik STMI Jakarta, Indonesia

³Universitas Indonesia, Indonesia

*) Corresponding author: fadhillahansyari@stmi.ac.id

Abstract

Bioethanol is a promising renewable energy source because it can be produced from carbohydrate-rich materials and natural waste, which are inexpensive and easily obtainable. Technologies for separating ethanol-water mixtures include advanced distillation, pervaporation, and adsorption. Adsorption is an effective method for purifying bioethanol with cost efficiency and high purity yields. Silica gel, used as an adsorbent, is a form of silica obtained from the coagulation process of sodium silicate sol (NaSiO₂). The surface of silica contains polar SiOH and SiOSi groups. This study investigates the effects of adsorbent regeneration on the purification of ethanol-water mixtures using continuous adsorption in a fixed bed. The silica gel adsorbent was regenerated by oven heating at temperatures ranging from 115°C to 130°C. The aim of this research is to obtain data on the ethanol concentration ratio of the input and output from the column, which is then presented as a breakthrough curve. The results indicate that the regenerated silica gel adsorbent exhibits a more rapid effective time and penetration compared to new silica gel. The ethanol concentration for blue silica gel at an initial concentration of 50% is 62.50%, and at 10% is 26.50%. These results are superior to those of white silica gel, which yields an ethanol concentration of 62.10% at an initial concentration of 50% and 23.50% at 10%.

Abstrak

Bioetanol adalah sumber energi terbarukan yang menjanjikan karena dapat diproduksi dari bahan yang kaya karbohidrat dan limbah alam yang murah serta mudah didapatkan. Teknologi pemisahan campuran etanol-air meliputi distilasi lanjutan, pervaporasi, dan adsorpsi. Adsorpsi efektif untuk memurnikan bioetanol dengan biaya yang efisien dan menghasilkan kemurnian yang tinggi. Silika gel sebagai adsorben merupakan salah satu bentuk silika yang diperoleh dari proses penggumpalan sol natrium silikat (NaSiO₂). Permukaan silika mengandung gugus-gugus SiOH dan SiOSi yang bersifat polar. Penelitian ini mengkaji efek regenerasi adsorben pada pemurnian campuran etanol-air menggunakan adsorpsi kontinu pada unggun tetap. Adsorben silika gel diregenerasi dengan pemanasan oven pada suhu 115°C hingga 130°C. Tujuan penelitian ini adalah memperoleh data rasio konsentrasi etanol yang keluar dan masuk ke dalam kolom, yang kemudian ditampilkan dalam kurva breakthrough. Hasil penelitian menunjukkan bahwa adsorben silika gel yang diregenerasi memiliki waktu efektif dan penetrasi lebih cepat dibandingkan silika gel baru. Konsentrasi etanol untuk silika gel biru pada konsentrasi awal 50% adalah 62,50%, dan pada konsentrasi awal 10% adalah 26,50%. Hasil ini lebih baik dibandingkan silika gel putih yang menghasilkan konsentrasi 62,10% pada konsentrasi awal 50% dan 23,50% pada konsentrasi awal 10%.

Keywords : Adsorption, bioethanol, ethanol-water, regeneration, silica-gel

PENDAHULUAN

Ketersediaan energi fosil yang menipis dapat menyebabkan krisis energi dan mengganggu pertumbuhan ekonomi global [1]. Biofuel, seperti bioetanol, menjadi solusi sebagai sumber energi terbarukan yang menjanjikan [2]. Bioetanol, hasil fermentasi glukosa, memiliki kemurnian 5-12%, yang belum memenuhi syarat sebagai bahan bakar berdasarkan ASTM D4806 yang memerlukan kandungan air maksimal 1% dan kemurnian 99% [3]. Pemurnian bioetanol biasanya dilakukan melalui distilasi, namun terkendala campuran azeotrop antara etanol dan air yang memiliki suhu didih sama [4].

Bioetanol adalah sumber energi terbarukan yang menjanjikan karena dapat diproduksi dari bahan kaya karbohidrat dan limbah alam, sehingga bahan mentahnya murah dan mudah diperoleh [5]. Bioetanol memiliki nilai oktan tinggi yang meningkatkan performa mesin saat dicampur dengan gasolin [3]. Kandungan oksigen yang lebih tinggi pada bioetanol menghasilkan pembakaran yang lebih bersih dibandingkan gasolin murni [6]. Agar dapat digunakan sebagai pengganti atau campuran aditif pada gasolin, bioetanol harus memiliki kemurnian 99,5 wt% alkohol atau disebut fuel grade bioethanol [7].

Menurut standar ASTM, bioetanol yang digunakan sebagai campuran bahan bakar harus memiliki kemurnian 99,5 wt% [7]. Namun, memperoleh bioetanol dengan kemurnian tinggi terkendala oleh kondisi azeotrop pada campuran etanol dan air [3].

Adsorpsi adalah proses pemurnian bioetanol yang efektif dari segi biaya dan proses untuk mencapai kemurnian tinggi [8]. Silika gel sebagai adsorben, berbentuk butiran berpori seperti kaca, dibuat dari natrium silikat sintesis [9]. Silika gel adalah mineral alami yang dimurnikan dan diolah [8]. Fungsi utama silika gel adalah sebagai pengering, mencegah kelembapan berlebihan [10]. Pada proses adsorpsi, silika gel sering digunakan sebagai adsorben karena polaritasnya yang tinggi dan sifat hidrofiliknya [11]. Silika gel adalah bentuk amorf yang sangat berpori dari silikon dioksida, disintesis dari natrium silikat dan asam sulfat [12]. Dengan pori-pori aktif yang saling berhubungan, silika gel dapat menyerap hingga 40% berat keringnya dalam uap air melalui adsorpsi dan pengaruh kapiler [12].

Selain faktor ukuran dan distribusi pori, mekanisme adsorpsi juga sangat dipengaruhi oleh interaksi antar molekul seperti ikatan hidrogen, gaya Van der Waals, dan interaksi elektrostatik. Gugus -OH pada permukaan silika gel mampu membentuk ikatan hidrogen dengan molekul air, sementara keberadaan ion logam seperti Co^{2+} pada silika gel biru dapat meningkatkan kekuatan adsorpsi melalui interaksi elektrostatik terhadap molekul polar [24]. Gaya Van der Waals juga berperan dalam interaksi lemah antara permukaan silika dengan molekul etanol, meskipun lebih dominan pada air sebagai adsorbat polar.

Silika gel dibuat dengan mereaksikan natrium silikat kuat dengan asam klorida pada suhu dan pH terkendali, membentuk gel [10]. Silika gel digunakan dalam industri sebagai filter, pendukung katalis, agen dehidrasi, dan dalam AC [12]. Air tertahan di permukaan silika gel melalui gaya dispersi dan kutub, seperti mekanisme ikatan hidrogen [13].

Adsorpsi pada silika gel menggunakan dua jenis adsorben: silika gel putih dan biru. Silika gel putih, umum digunakan, dibuat dari sodium silikat dengan nanopori berukuran 0,4 nm yang hydrophilic dan menyerap air di udara [12]. Silika gel biru, yang penggunaannya dibatasi karena mengandung cobalt chloride yang karsinogenik, memiliki daya serap tinggi, tahan lama, dan mencegah jamur [12]. Selain itu, silika gel biru menyerap kelembapan dengan cepat.

Silika gel putih dibuat dari natrium silikat (Na_2SiO_3) tanpa tambahan indikator kimia, memiliki sifat hidrofilik alami karena struktur Si-OH-nya. Sebaliknya, silika gel biru mengandung Cobalt (II) chloride (CoCl_2) sebagai indikator kelembapan yang memberi warna biru saat kering dan berubah merah muda saat jenuh uap air. Kehadiran ion Co^{2+} dapat memengaruhi mekanisme

adsorpsi melalui interaksi elektrostatis dengan molekul polar seperti air, meskipun tetap harus diperhatikan aspek toksisitasnya sebagai senyawa karsinogenik

Setiap adsorben memiliki kapasitas adsorpsi yang akan mencapai titik jenuh, sehingga memerlukan penggantian [14]. Alternatifnya adalah regenerasi adsorben untuk memperbarui kapasitas adsorpsinya, yang lebih murah daripada penggantian [12]. Regenerasi penting dari segi ekonomi dan lingkungan, karena adsorben bekas adalah limbah berbahaya yang memerlukan perlakuan dan fasilitas khusus untuk pengolahannya.

Penelitian ini menggunakan proses adsorpsi dengan adsorben silika gel teregenerasi pada konsentrasi awal etanol 95% untuk mengetahui pengaruh regenerasi adsorben silika gel terhadap pemurnian etanol [15]. Sebelumnya, penelitian mengenai efek regenerasi adsorben terhadap adsorpsi bioetanol telah dilakukan dengan menggunakan adsorben yang berbeda dan konsentrasi etanol bervariasi mulai dari 50% dengan kelipatan variasi 10% [16]. Penelitian ini bertujuan untuk menunjukkan perbedaan yang terjadi ketika menggunakan adsorben silika gel, karena silika gel memiliki nilai ekonomi yang lebih rendah dan lebih umum digunakan sebagai adsorben dalam kehidupan sehari-hari. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar untuk penelitian lebih lanjut mengenai penggunaan silika gel sebagai adsorben dalam proses pemurnian etanol.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah eksperimen atau percobaan yang mencakup sebagai berikut:

1. Persiapan alat dan bahan

Pada tahap persiapan alat dan bahan, langkah pertama adalah menyiapkan adsorben silika gel dalam dua varian, yaitu silika gel biru dan silika gel putih. Kedua jenis silika gel ini akan digunakan dalam proses adsorpsi untuk mempelajari perbedaannya dalam pemurnian etanol. Selanjutnya, alat uji adsorpsi unggun tetap kontinyu disiapkan dengan dimensi spesifik, yaitu diameter 5,08 cm dan panjang 100 cm, untuk memastikan pengujian dilakukan dalam kondisi yang seragam dan terkendali. Terakhir, sebanyak 3150 mL etanol dengan dua konsentrasi berbeda, yaitu 50%v/v dan 10%v/v, dipersiapkan untuk setiap percobaan. Etanol ini akan digunakan sebagai umpan dalam proses adsorpsi untuk mempelajari efektivitas silika gel dalam berbagai kondisi konsentrasi.

2. Proses adsorpsi dalam kolom

Proses adsorpsi dalam kolom dimulai dengan mengalirkan umpan etanol berkonsentrasi 50%v/v dan 10%v/v secara bergantian melalui kolom adsorpsi. Proses ini dilakukan menggunakan laju alir tetap sebesar 10 mL/menit dan dioperasikan pada suhu 20°C selama 5 jam. Selama periode ini, sampel diambil secara berkala untuk memantau perubahan konsentrasi etanol. Data yang diperoleh dari pengambilan sampel ini kemudian diproses untuk membuat kurva breakthrough, yaitu dengan memplot konsentrasi etanol terhadap waktu. Kurva ini memberikan gambaran tentang dinamika proses adsorpsi, khususnya mengenai titik jenuh adsorben. Selain itu, dari kurva breakthrough tersebut, dihitung kapasitas adsorpsi, waktu efektif, dan waktu penetrasi dari proses adsorpsi. Kapasitas adsorpsi mengukur jumlah etanol yang dapat diserap oleh adsorben, sedangkan waktu efektif dan waktu penetrasi memberikan informasi tentang efisiensi waktu proses adsorpsi. Analisis ini penting untuk menentukan performa dan efektivitas adsorben dalam berbagai kondisi operasional.

3. Pengolahan data

Setelah pelaksanaan proses adsorpsi kontinu pada unggun tetap, diperoleh hasil eksperimen berupa konsentrasi etanol yang telah melalui proses adsorpsi (C_i) dan konsentrasi awal etanol

sebelum adsorpsi (C_0). Data ini dikumpulkan melalui pengambilan sampel setiap 30 menit selama 8 jam, menghasilkan 16 titik sampling. Data yang diperoleh dari titik-titik sampling tersebut kemudian diolah untuk menentukan rasio konsentrasi etanol setelah adsorpsi terhadap konsentrasi awal etanol. Hasil ini disajikan dalam bentuk kurva breakthrough, yang memplot rasio C_0/C_i terhadap waktu percobaan. Kurva *breakthrough* ini kemudian dianalisis lebih lanjut untuk menentukan parameter-parameter penting seperti kemurnian etanol tertinggi yang dapat dicapai oleh setiap jenis adsorben, kapasitas adsorpsi, waktu efektif, dan waktu penetrasi. Kapasitas adsorpsi tiap adsorben dihitung menggunakan formula berikut:

$$q_e = \sum_{t=0}^{t=n} (C_0 - C_i) \times \frac{Q \times \Delta t \times \rho}{W} \quad (1)$$

Di mana:

- q_e adalah kapasitas adsorpsi,
- C_0 adalah konsentrasi awal etanol,
- C_i adalah konsentrasi etanol setelah adsorpsi,
- Q adalah laju alir campuran etanol-air yang masuk ke dalam kolom unggun tetap,
- Δt adalah selang waktu setiap pengambilan sampel,
- ρ adalah densitas etanol pada kemurnian tertentu,
- W adalah massa adsorben yang digunakan dalam kolom adsorpsi.

4. Analisis hasil adsorpsi

Tahap analisis hasil adsorpsi bertujuan untuk memahami hubungan dan pengaruh berbagai parameter penting dalam proses adsorpsi. Analisis dilakukan untuk melihat bagaimana jenis silika gel yang digunakan dan variasi konsentrasi awal etanol mempengaruhi efisiensi dan efektivitas proses adsorpsi. Selain itu, uji kemurnian etanol dilakukan menggunakan alat density meter (DMA 4100 M) untuk mengukur kandungan etanol yang tersisa setelah proses adsorpsi.

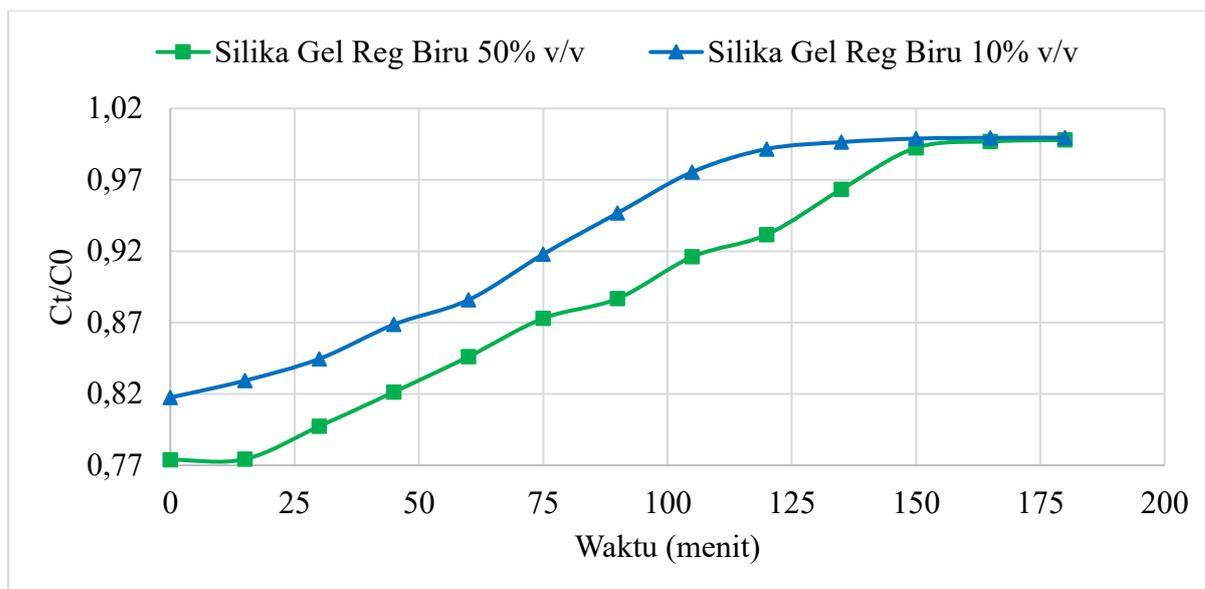
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Regenerasi terhadap Konsentrasi Umpan pada Adsorben

Uji adsorpsi dilakukan pada suhu dan tekanan ruangan dengan laju alir 10 mL/menit melalui kolom adsorpsi unggun tetap secara kontinu selama 3 jam (180 menit) hingga adsorben silika gel mencapai titik jenuh. Sampel diambil setiap 15 menit, menghasilkan 13 sampel untuk setiap jenis adsorben. Uji densitas kemudian dilakukan menggunakan densitometer untuk menentukan konsentrasi etanol dan densitasnya. Uji densitas juga dilakukan pada sampel standar sebelum perlakuan untuk menentukan konsentrasi etanol umpan, yaitu 50% dan 10%.

1. Pengaruh Regenerasi terhadap Variasi Komposisi Etanol-Air Silika Gel Biru

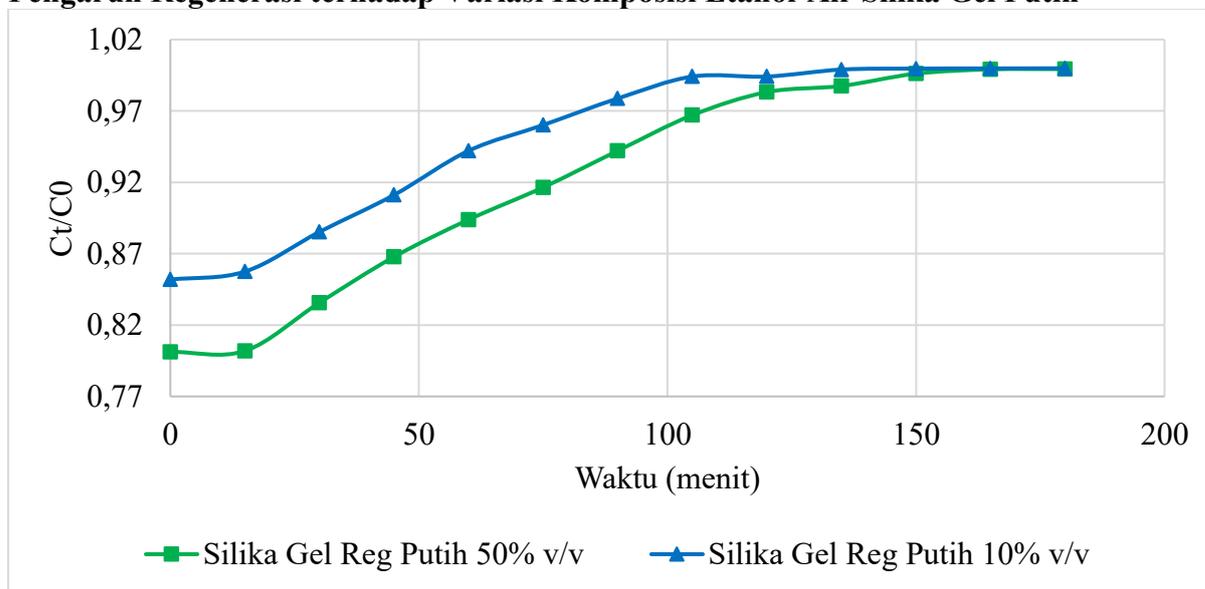
Penelitian ini menggunakan konsentrasi awal umpan sebesar 51,13% dan adsorben silika gel biru yang telah diregenerasi, menghasilkan konsentrasi akhir tertinggi sebesar 62,17%. Hasil ini mempengaruhi kurva breakthrough. Pada proses adsorpsi dalam sistem fixed bed, adsorben dan adsorbat terus-menerus berinteraksi saat melewati kolom. Titik jenuh adsorpsi ditunjukkan pada kurva breakthrough yang terjadi pada menit ke-145 dengan konsentrasi umpan sebesar 52,52%. Perubahan ini terjadi karena perpindahan massa antara silika gel dan adsorbat, sesuai dengan hukum Fick yang pertama [17]. Gradien konsentrasi dalam penelitian ini bertindak sebagai driving force, sehingga semakin besar gradien, semakin besar pula fluks perpindahan massa [18].



Gambar 1. Kurva *Breakthrough* pada Silika Gel Biru

Pada percobaan kedua, dengan konsentrasi awal umpan sebesar 10,59% dan adsorben silika gel biru yang juga telah diregenerasi, didapatkan konsentrasi etanol tertinggi sebesar 29,75%. Titik jenuh pada percobaan ini terjadi pada menit ke-115 dengan konsentrasi umpan sebesar 11,90%. Dibandingkan dengan adsorben baru, kapasitas adsorpsi silika gel teregenerasi menunjukkan efisiensi regenerasi sekitar 90%. Meskipun ada sedikit penurunan kapasitas adsorpsi, efisiensi regenerasi yang tinggi menunjukkan bahwa silika gel teregenerasi masih layak digunakan untuk pemisahan campuran etanol-air dengan rasio 50:50.

2. Pengaruh Regenerasi terhadap Variasi Komposisi Etanol-Air Silika Gel Putih



Gambar 2. Kurva *Breakthrough* pada Silika Gel Putih

Penelitian menggunakan silika gel putih yang telah diregenerasi, dengan konsentrasi awal umpan sebesar 53,56%, menunjukkan hasil tertinggi 62,79%. Hasil ini mempengaruhi kurva breakthrough. Proses adsorpsi dilakukan dalam sistem fixed bed, di mana adsorben dan

adsorbat terus-menerus berinteraksi di dalam kolom. Titik jenuh adsorpsi terlihat pada kurva breakthrough yang terjadi pada menit ke-125 dengan konsentrasi umpan sebesar 54,20%. Pada percobaan kedua, dengan konsentrasi awal umpan 10,21% dan adsorben silika gel biru yang telah diregenerasi, didapatkan konsentrasi etanol tertinggi 23,50%. Titik jenuh pada percobaan ini terjadi pada menit ke-95 dengan konsentrasi umpan 12,10%. Kapasitas adsorpsi silika gel setelah regenerasi tidak jauh berbeda dengan adsorben baru. Meskipun ada sedikit penurunan kapasitas adsorpsi, efisiensi regenerasi masih tinggi, sehingga silika gel teregenerasi tetap layak digunakan untuk pemisahan campuran etanol-air dengan rasio 50:50.

Perbandingan Hasil Eksperimen pada Adsorben Silika Gel Biru dan Putih untuk Proses Regenerasi dengan Hasil Non Regenerasi

Proses adsorpsi dilakukan menggunakan silika gel, baik yang baru maupun yang telah diregenerasi satu kali. Regenerasi dilakukan secara termal dengan memanaskan adsorben dalam oven pada suhu 130°C selama 2-3 jam, hingga tidak terjadi perubahan massa. Meskipun kedua adsorben mengalami proses regenerasi yang sama, kinerja adsorpsi berbeda pada campuran umpan etanol dengan perbandingan 50:50 dan 10:90. Hal ini disebabkan oleh pengaruh konsentrasi umpan etanol terhadap adsorben.

Tabel 1. Kinerja Adsorpsi pada Adsorben Baru di Konsentrasi Awal Etanol 50% v/v

Parameter	Silika Gel Biru	Silika Gel Putih
Waktu Adsorpsi Efektif (min)	30	30
Waktu Penetrasi (min)	145	145
Total Kapasitas Adsorpsi (g water/g ads)	0,128	0,123
Kemurnian Etanol Tertinggi (%v/v)	62,77%	61,70%

Tabel 2. Kinerja Adsorpsi pada Adsorben Regenerasi di Konsentrasi Awal Etanol 50% v/v

Parameter	Silika Gel Biru	Silika Gel Putih
Waktu Adsorpsi Efektif (min)	15	15
Waktu Penetrasi (min)	135	135
Total Kapasitas Adsorpsi (g water/g ads)	0,069	0,065
Kemurnian Etanol Tertinggi (%v/v)	62,50%	62,10%

Berdasarkan Tabel 2, performa adsorpsi setelah regenerasi adsorben menunjukkan penurunan. Pada perbandingan etanol:air = 50:50, kapasitas adsorpsi silika gel biru baru adalah 0.128 gram air/gram adsorben, sementara setelah regenerasi menurun menjadi 0.069 gram air/gram adsorben. Silika gel putih baru memiliki kapasitas adsorpsi 0.123 gram air/gram adsorben, yang menurun menjadi 0.065 gram air/gram adsorben setelah regenerasi.

Penurunan kapasitas adsorpsi ini disebabkan oleh perubahan struktur pori pada silika gel setelah regenerasi termal [21]. Oleh karena itu, suhu saat regenerasi harus diperhatikan untuk mencegah kerusakan adsorben. Khusus untuk silika gel, luas permukaan dan struktur permukaannya sangat penting dalam proses adsorpsi. Semakin sering adsorben diregenerasi, semakin menurun kinerjanya dalam proses adsorpsi [19].

Proses adsorpsi menggunakan silika gel terjadi karena sifat polar adsorben. Fungsionalitas polar silika gel berinteraksi kuat dengan partikel polar lainnya, sedangkan fungsionalitas nonpolar berinteraksi lemah [21]. Air, sebagai senyawa polar, mudah teradsorpsi oleh silika gel, sementara etanol tidak karena merupakan senyawa polar-nonpolar. Silika gel dengan ukuran pori sekitar 0,4 nm dapat menyerap molekul air dengan diameter 0,28 nm, tetapi tidak dapat menyerap etanol dengan diameter 0,44 nm. Selain itu, silika gel mampu menyerap kelembapan hingga 40% dari beratnya. Silika gel biru memiliki diameter partikel lebih kecil daripada silika gel putih, sehingga

kemampuan adsorpsinya lebih unggul karena luas permukaan yang lebih besar meskipun perbedaan ukuran partikel tidak signifikan [22].

Tabel 3. Kinerja Adsorpsi pada Adsorben Baru di Konsentrasi Awal Etanol 10% v/v

Parameter	Silika Gel Biru	Silika Gel Putih
Waktu Adsorpsi Efektif (min)	15	15
Waktu Penetrasi (min)	120	120
Total Kapasitas Adsorpsi (g water/g ads)	0,152	0,124
Kemurnian Etanol Tertinggi (%v/v)	30,44%	27,22%

Tabel 4. Kinerja Adsorpsi pada Adsorben Regenerasi di Konsentrasi Awal Etanol 10% v/v

Parameter	Silika Gel Biru	Silika Gel Putih
Waktu Adsorpsi Efektif (min)	15	15
Waktu Penetrasi (min)	110	110
Total Kapasitas Adsorpsi (g water/g ads)	0,12	0,08
Kemurnian Etanol Tertinggi (%v/v)	26,50%	23,50%

Berdasarkan Tabel 3 dan 4, dengan konsentrasi awal etanol 10%v/v, kapasitas adsorpsi silika gel biru baru adalah 0,152 gram air/gram adsorben, sedangkan setelah regenerasi menjadi 0,120 gram air/gram adsorben. Silika gel putih baru memiliki kapasitas adsorpsi 0,124 gram air/gram adsorben, dan setelah regenerasi menjadi 0,080 gram air/gram adsorben. Meskipun ada penurunan kapasitas adsorpsi, efisiensi regenerasi tetap tinggi sehingga silika gel yang telah diregenerasi masih layak digunakan untuk pemisahan campuran etanol-air dengan rasio 10:90.

Selama proses regenerasi, beberapa molekul air pada silika gel tidak sepenuhnya hilang, dan struktur adsorben mengalami sedikit perubahan, seperti pecahnya struktur yang menyebabkan penurunan kapasitas adsorpsi [8]. Oleh karena itu, suhu selama regenerasi harus diperhatikan untuk mencegah kerusakan adsorben [23]. Kinerja adsorpsi menurun dengan seringnya regenerasi [24].

Adsorben untuk konsentrasi etanol 10%v/v memiliki kapasitas adsorpsi lebih besar dibandingkan konsentrasi etanol 50%v/v. Peningkatan konsentrasi air meningkatkan nilai q_e dan gaya perpindahan massa [15]. Regenerasi silika gel untuk etanol 50% memiliki efektivitas lebih tinggi dibandingkan dengan konsentrasi etanol 10%, karena beberapa molekul air tetap terikat setelah regenerasi, menyebabkan penurunan kapasitas adsorpsi.

Hal ini mengindikasikan bahwa penurunan kapasitas adsorpsi tidak semata-mata disebabkan oleh degradasi fisik pori, namun juga berhubungan dengan hilangnya atau berubahnya gugus aktif seperti -OH dan situs aktif ionik pada permukaan silika gel. Menurut [24], keberadaan komponen aktif seperti ion logam dapat memperkuat gaya interaksi antar molekul selama proses adsorpsi, sehingga perubahan kimiawi pasca-regenerasi dapat menyebabkan berkurangnya efisiensi adsorpsi.

KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini adalah konsentrasi yang dihasilkan untuk adsorben silika gel biru dengan konsentrasi awal 50% mencapai 62,50%, sedangkan untuk konsentrasi awal 10% adalah 26,50%. Hasil ini lebih baik dibandingkan dengan silika gel putih, yang menghasilkan konsentrasi 62,10% untuk konsentrasi awal 50% dan 23,50% untuk konsentrasi awal 10%. Waktu efektif dan waktu penetrasi adsorben silika gel teregenerasi lebih cepat dibandingkan dengan adsorben silika gel baru. Selama proses regenerasi, beberapa molekul air pada silika gel tidak sepenuhnya hilang dan struktur adsorben mengalami perubahan berupa pecahnya struktur, yang menyebabkan

penurunan kapasitas adsorpsi secara signifikan dibandingkan dengan kapasitas adsorpsi pada adsorben baru.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik STMI Jakarta dan Universitas Indonesia atas dana yang diberikan untuk penelitian ini. Penelitian ini didukung oleh fasilitas riset serta dukungan ilmiah dan teknis dari Laboratorium Polimer, Laboratorium Instrumentasi Polimer, Politeknik STMI Jakarta, dan Laboratorium Energi Berkelanjutan Universitas Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Arifin, Efrizal, And Johan Sainima. "Perancangan Alat Penyemprot Hama Tanaman Tipe Knapsack Berbasis Solar Panel 20 Wp." Universitas Muhammadiyah Magelang, Vol. 1, No. 2, 30 Nov. 2017, <https://doi.org/10.31000/Mbjtm.V1i2.729>
- [2]. Darpono, Rony, And Rahma Dewi. "Simulasi Pemilihan Turbin Air Menggunakan Simulator Turbnpro Studi Kasus Pltmh Malabar." Politeknik Harapan Bersama Tegal, Vol. 8, No. 2, 1 Aug. 2020, P. 29-36. <https://doi.org/10.30591/Polektro.V8i2.1405>
- [3]. Mahendra, Awal, Kariza, And Liliana Liliana. "Potensi Listrik Bioetanol Air Kelapa Tua Serta Analisis Biaya Investasinya Di Provinsi Riau." Universitas Nahdlatul Ulama Blitar, Vol. 8, No. 3, 30 Aug. 2023, P. 748-748. <https://doi.org/10.28926/Briliant.V8i3.1362>.
- [4]. Sriana, Tun, Et Al. "The Azeotropic Distillation For Bioethanol Purification: The Effects Of Entrainer Solvents." Iop Publishing, Vol. 506, No. 1, 1 May. 2020, P. 012007-012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/506/1/012007>.
- [5]. Anggita, Ayu, Sri, Et Al. "Pra-Desain Pabrik Bioetanol Dari Jerami Padi." Lembaga Penelitian Dan Pengabdian Kepada Masyarakat (Lp2m), Vol. 10, No. 2, 22 Dec. 2021, <https://doi.org/10.12962/J23373539.V10i1.70675>.
- [6]. Purba, Hasianna, Esteria, Devi, Et Al. "Pembuatan Bioetanol Dari Kupasan Kentang (Solanum Tuberosum L.) Dengan Proses Fermentasi." Udayana University, 1 Jan. 2016, <https://doi.org/10.24843/Jchem.2016.V10.I01.P21>.
- [7]. Novia, Et Al. "Pengaruh Penambahan Bahan Pengental Pembuatan Bioetanol Gel Dan Uji Perpindahan Panas Dengan Simulasi Ansys Fluent16." , Vol. 24, No. 2, 1 Jul. 2018, P. 63-69. <https://doi.org/10.36706/Jtk.V24i2.433>.
- [8]. Suharto, Muhammad, Et Al. "Optimasi Pemurnian Etanol Dengan Distilasi Ekstraktif Menggunakan Chemcad." , Vol. 6, No. 1, 19 May. 2023, P. 1-7. <https://doi.org/10.33795/Distilat.V6i1.53>.
- [9]. Wardani, Krisna, Agustin, And Fenty Nurtyastuti Eka Pertiwi. "Produksi Etanol Dari Tetes Tebu Oleh Saccharomyces Cerevisiae Pembentuk Flok (Nrrl – Y 265)." Gadjah Mada University, Vol. 33, No. 2, 23 Aug. 2013, <https://doi.org/10.22146/Agritech.9810>.
- [10]. Fibriari, Ira, Et Al. "Pengkayaan Alkohol Ciu Bekonang Dengan Metode Destilasi Adsorptif Menggunakan Zeolit Alam Dan Silika Gel." Diponegoro University, Vol. 15, No. 3, 1 Dec. 2012, P. 79-83. <https://doi.org/10.14710/Jksa.15.3.79-83>.
- [11]. Abidin, Zaenal, Et Al. "Gelation Properties Of Nano-Tube Imogolite: Potential Application As Herbal Delivery Material." Iop Publishing, Vol. 187, 19 Nov. 2018, P. 012072-012072. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/187/1/012072>.
- [12]. Buhani, Buhani, Et Al. "Chemical Stability Of Cd(Ii) And Cu(Ii) Ionic Imprinted Amino-Silica Hybrid Material In Solution Media." Islamic University Of Indonesia, Vol. 13, No. 1-2, 3 Feb. 2016, P. 1-10. <https://doi.org/10.20885/Eksakta.Vol13.Iss1-2.Art1>.

- [13]. Rizki, Dwi, Sekar. "Peningkatan Kualitas Air Dengan Menggunakan Sistem Filtrasi Pada Pengolahan Air Baku." , Vol. 25, No. 1, 1 Apr. 2021, P. 19-22. <https://doi.org/10.23960/Rekrjits.V25i1.20>.
- [14]. Setyabudi, Putra, Eka, Herlando, Et Al. "Removal Natrium (Na⁺), Klorida (Cl⁻), Dan Kesadahan Air Payau Dengan Resin Penukar Ion." , Vol. 18, No. 1, 28 Jan. 2020, P. 7-14. <https://doi.org/10.36456/Waktu.V18i01.2305>.
- [15]. Sulistiyowati, Indah, Henita, And Prayitno Prayitno. "Pengolahan Air Limbah Industri Pengolahan Rumput Laut Menggunakan Nano Adsorben Tersuspensi." , Vol. 7, No. 2, 22 May. 2023, P. 514-521. <https://doi.org/10.33795/Distilat.V7i2.272>.
- [16]. Oktavianto, Putra, Et Al. "Bioethanol Production From Coconut Husk Using The Wet Gamma Irradiation Method." , Vol. 14, No. 2, 6 Oct. 2021, P. 43-43. <https://doi.org/10.17146/Jfn.2020.14.2.5908>.
- [17]. Basir, Md, Faisal, Md, Et Al. "Stability Analysis Of Unsteady Stagnation-Point Gyrotactic Bioconvection Flow And Heat Transfer Towards The Moving Sheet In A Nanofluid." Elsevier Bv, Vol. 65, 1 Jun. 2020, P. 538-553. <https://doi.org/10.1016/J.Cjph.2020.02.021>.
- [18]. Sevnur, Sevnur, Et Al. "Pengaruh Penggunaan Silicafume Terhadap Kuat Tekan, Kuat Tarik Belah, Dan Porositas Beton Di Lingkungan Gambut." , Vol. 6, No. 1, 1 Apr. 2021, P. 10-10. <https://doi.org/10.32511/Juteks.V6i1.692>
- [19]. Luna, Prima, Et Al. "Teknologi Pembuatan Adsorben Dari Limbah Ekstraksi Biosilika Sekam Padi." Universitas Pasundan, Vol. 7, No. 3, 5 Dec. 2020, P. 116-125. <https://doi.org/10.23969/Pftj.V7i3.3001>.
- [20]. Cho, Seungyeoun, Et Al. "A Review Of The Regeneration Models Using A Closed Stone Quarry Area Through Domestic And Overseas Cases." , Vol. 58, No. 3, 1 Jun. 2021, P. 237-248. <https://doi.org/10.32390/Ksmer.2021.58.3.237>.
- [21]. Santi, Soraya, Sintha, Et Al. "Karakteristik Gugus Fungsi Pada Polimerisasi Silika Selulosa." , Vol. 15, No. 2, 23 May. 2021, https://doi.org/10.33005/Jurnal_Tekkim.V15i2.2558.
- [22]. D. Nur'aeni, E. P. Hadisantoso And D. Suhendar, "Adsorpsi Ion Logam Mn²⁺ Dan Cu²⁺ Oleh Silika Gel Dari Abu Ampas Tebu".
- [23]. Oladosu, Lekan, Temidayo, Et Al. "Desiccant Solutions, Membrane Technologies, And Regeneration Techniques In Liquid Desiccant Air Conditioning System." Wiley-Blackwell, Vol. 45, No. 6, 4 Feb. 2021, P. 8420-8447. <https://doi.org/10.1002/Er.6482>.
- [24]. Dewi, Tironika, Widya, Putu, Ni, Et Al. "Modifikasi Lempung Bentonit Teraktivasi Asam Dengan Benzalkonium Klorida Sebagai Adsorben Zat Warna Rhodamine B." Udayana University, 26 Jan. 2017, <https://doi.org/10.24843/Jchem.2017.V11.I01.P12>.