

Studi Kinerja Distilasi Packed Kolom dan Adsorpsi Silika Gel dalam Pemisahan Etanol–Air

Trisna Kumala Dhaniswara^{1*}, Fenni Suryanti²

¹Program Studi Teknik Kimia, Universitas Nahdlatul Ulama Sidoarjo, Indonesia;

²Program Studi Teknik Kimia, Universitas Nahdlatul Ulama Pasuruan, Indonesia.

Abstrak

Pemurnian etanol dari campuran alkohol dan air merupakan tahapan penting dalam produksi bioetanol, terutama untuk meningkatkan kualitas produk akhir. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja pemisahan etanol melalui kombinasi proses distilasi menggunakan kolom berkemasan dan adsorpsi menggunakan silika gel. Variasi rasio refluks distilasi sebesar 1,36; 2,86; dan 3,00 mL/min serta temperatur adsorpsi 80°C, 90°C, 100°C, dan 110°C digunakan untuk menentukan kondisi operasi optimum. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan rasio refluks meningkatkan konsentrasi etanol hasil distilasi, dengan nilai tertinggi diperoleh pada rasio refluks 3,00 mL/min. Pada tahap adsorpsi, temperatur 80°C menghasilkan konsentrasi etanol tertinggi dan persentase penyerapan air terbesar. Selain itu, penggunaan pelarut octanol memberikan kinerja pemisahan yang lebih baik dibandingkan dodecanol.

Kata kunci

Adsorpsi Silika Gel; Distilasi; Etanol; Molases

Abstract

Purification of ethanol from alcohol–water mixtures is an essential step in bioethanol production to improve the quality of the final product. This study aims to evaluate the performance of ethanol separation using a combination of packed column distillation and adsorption with silica gel. Variations in distillation reflux ratios of 1.36, 2.86, and 3.00 mL/min, as well as adsorption temperatures of 80°C, 90°C, 100°C, and 110°C, were applied to determine the optimum operating conditions. The results indicate that increasing the reflux ratio enhances the ethanol concentration in the distillate, with the highest value obtained at a reflux ratio of 3.00 mL/min. In the adsorption stage, an operating temperature of 80°C produced the highest ethanol concentration and the greatest water adsorption efficiency. In addition, the use of octanol as a solvent resulted in better separation performance compared to dodecanol.

Keywords

Silica Gel Adsorption; Distillation; Ethanol; Molasses

Korespondensi
Trisna Kumala Dhaniswara
trisnakumala.tkm@unusida.ac.id

Pendahuluan

Kebutuhan energi yang terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk dan aktivitas industri mendorong perlunya pengembangan sumber energi alternatif yang berkelanjutan. Ketergantungan terhadap bahan bakar fosil tidak hanya menimbulkan permasalahan ketersediaan sumber daya dalam jangka panjang, tetapi juga berdampak pada peningkatan emisi gas rumah kaca dan degradasi lingkungan. Oleh karena itu, pemanfaatan energi terbarukan menjadi salah satu fokus utama dalam pengembangan teknologi energi saat ini. Salah satu bentuk energi terbarukan yang telah banyak dikaji dan diaplikasikan adalah bioetanol (Kleizen, 2006).

Bioetanol merupakan alkohol berbasis biologis yang umumnya dihasilkan melalui proses fermentasi bahan baku yang mengandung gula, pati, atau lignoselulosa. Bioetanol banyak dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif, baik sebagai bahan bakar tunggal maupun sebagai campuran bensin, karena memiliki bilangan oktan yang tinggi dan karakteristik pembakaran yang relatif lebih bersih (Li et al., 2013). Selain itu, bioetanol juga berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil serta menurunkan emisi karbon monoksida dan hidrokarbon tak terbakar.

Salah satu bahan baku yang potensial untuk produksi bioetanol adalah molasses, yaitu produk samping dari industri gula. Molasses masih mengandung kadar gula yang cukup tinggi sehingga sangat sesuai untuk digunakan sebagai substrat fermentasi. Pemanfaatan molasses tidak hanya memberikan nilai tambah terhadap limbah industri gula, tetapi juga mendukung konsep ekonomi sirkular dengan memaksimalkan pemanfaatan hasil samping industri. Namun demikian, etanol hasil fermentasi umumnya memiliki kadar yang relatif rendah dan masih bercampur dengan air serta senyawa pengotor lainnya, sehingga memerlukan tahapan pemurnian lebih lanjut.

Proses pemurnian etanol merupakan tahapan penting yang menentukan kualitas produk akhir. Secara umum, pemisahan etanol dari campuran etanol-air dilakukan menggunakan proses distilasi. Distilasi merupakan metode pemisahan berbasis perbedaan titik didih komponen dan telah lama digunakan dalam industri kimia. Akan tetapi, pemisahan etanol-air menghadapi kendala tersendiri karena adanya azeotrop pada komposisi sekitar 95–96% etanol, yang menyebabkan distilasi konvensional tidak mampu menghasilkan etanol dengan kemurnian tinggi secara efisien (Mullins et al., 2006).

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, berbagai metode pemurnian lanjutan telah dikembangkan, antara lain distilasi azeotrop, distilasi ekstraktif, membran, serta adsorpsi. Salah satu pendekatan yang relatif sederhana dan ekonomis adalah penggabungan proses distilasi dengan adsorpsi (Yang, 2004). Pada sistem ini, distilasi digunakan sebagai tahap awal untuk meningkatkan konsentrasi etanol, kemudian dilanjutkan dengan proses adsorpsi untuk mengurangi kadar air sehingga diperoleh etanol dengan kemurnian yang lebih tinggi.

Penggunaan kolom distilasi berkemasan (packed column) menjadi alternatif yang banyak dikaji karena memiliki luas permukaan kontak yang besar antara fase uap dan cair, sehingga meningkatkan efisiensi perpindahan massa. Selain itu, kolom berkemasan umumnya memiliki penurunan tekanan yang lebih rendah dibandingkan kolom bertray, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi skala laboratorium maupun skala kecil hingga menengah. Pemilihan jenis packing juga berpengaruh terhadap kinerja distilasi, baik dari segi efisiensi pemisahan maupun stabilitas operasi.

Selain desain kolom, salah satu parameter penting dalam operasi distilasi adalah rasio refluks. Rasio refluks menentukan jumlah distilat yang dikembalikan ke dalam kolom untuk dikontakkan kembali dengan uap yang naik. Secara umum, peningkatan rasio refluks akan meningkatkan kemurnian produk, namun di sisi lain juga meningkatkan konsumsi energi dan menurunkan laju produksi. Oleh karena itu, optimasi rasio refluks menjadi langkah penting untuk memperoleh keseimbangan antara kualitas produk dan efisiensi proses.

Di sisi lain, proses adsorpsi telah banyak digunakan sebagai metode pemurnian lanjutan etanol, terutama untuk menghilangkan air dari campuran etanol-air. Adsorpsi bekerja berdasarkan kemampuan adsorben untuk mengikat molekul tertentu pada permukaannya. Silika gel merupakan salah satu adsorben yang paling umum digunakan karena memiliki afinitas tinggi terhadap air, luas permukaan spesifik yang besar, serta stabilitas termal dan kimia yang baik. Dengan memanfaatkan perbedaan afinitas adsorben terhadap air dan etanol, proses adsorpsi dapat meningkatkan kemurnian etanol secara signifikan.

Kinerja proses adsorpsi sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi, terutama temperatur. Temperatur berpengaruh terhadap kesetimbangan adsorpsi serta laju perpindahan massa antara fase uap dan permukaan adsorben. Pada temperatur tertentu, adsorpsi air dapat berlangsung secara optimal, sementara pada temperatur yang terlalu tinggi dapat terjadi penurunan kapasitas adsorpsi akibat meningkatnya energi kinetik molekul adsorbat dan terjadinya desorpsi. Oleh karena itu, optimasi temperatur adsorpsi menjadi aspek krusial dalam sistem pemurnian etanol berbasis adsorpsi (Blanchard et al., 2001).

Beberapa penelitian sebelumnya telah melaporkan bahwa kombinasi distilasi dan adsorpsi mampu menghasilkan etanol dengan kemurnian tinggi dibandingkan penggunaan distilasi konvensional saja (Li et al., 2021). Namun demikian, perbedaan bahan baku, desain peralatan, jenis adsorben, serta kondisi operasi menyebabkan hasil yang diperoleh sangat bervariasi. Selain itu, kajian yang mengombinasikan pengaruh rasio refluks distilasi dan temperatur adsorpsi dalam satu sistem terintegrasi masih relatif terbatas, khususnya pada pemurnian etanol yang berasal dari molasses.

Dalam konteks tersebut, penggunaan pelarut berbasis alkohol seperti dodecanol dan octanol dalam tahap pemisahan awal menjadi menarik untuk dikaji lebih lanjut. Perbedaan panjang rantai karbon pada kedua pelarut tersebut berpotensi memengaruhi interaksi molekuler dengan etanol serta distribusi komponen dalam sistem pemisahan. Pemahaman terhadap pengaruh jenis pelarut terhadap kinerja distilasi dan adsorpsi sangat penting untuk menentukan kondisi operasi yang optimal (Cui et al., 2019).

Penelitian ini difokuskan pada pemisahan etanol dari campuran solvent berbasis alkohol dan air melalui proses distilasi menggunakan kolom berkemasan yang dikombinasikan dengan proses adsorpsi menggunakan silika gel. Kajian dilakukan dengan memvariasikan rasio refluks pada proses distilasi serta temperatur pada proses adsorpsi untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap konsentrasi etanol dan efisiensi penyerapan air. Selain itu, analisis energi juga dilakukan untuk menilai kelayakan kondisi operasi yang diperoleh dari sisi kebutuhan energi.

Dengan pendekatan ini, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi pemurnian etanol yang lebih efisien dan aplikatif, khususnya untuk pemanfaatan bahan baku berbasis molasses. Hasil penelitian ini diharapkan tidak hanya bermanfaat secara akademis, tetapi juga dapat menjadi referensi bagi pengembangan proses pemurnian bioetanol pada skala yang lebih besar.

Secara umum, tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan kondisi operasi optimum pada proses distilasi dan adsorpsi dalam rangka meningkatkan kemurnian etanol. Adapun secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh rasio refluks terhadap konsentrasi etanol hasil distilasi pada kolom berkemasan, mengevaluasi pengaruh temperatur adsorpsi terhadap konsentrasi etanol dan persen penyerapan air oleh silika gel, serta menentukan kondisi operasi terintegrasi yang memberikan keseimbangan terbaik antara kemurnian etanol dan kebutuhan energi.

Dengan adanya kajian ini, diharapkan proses pemisahan etanol–air dapat dilakukan secara lebih efektif dan efisien melalui kombinasi teknologi distilasi dan adsorpsi. Pendekatan ini diharapkan dapat menjadi alternatif yang layak untuk meningkatkan kualitas bioetanol, khususnya yang berasal dari sumber daya terbarukan dan limbah agroindustri.

Metode

Penelitian ini menggunakan bahan baku berupa etanol hasil ekstraksi molasses yang masih mengandung air dan pelarut berbasis alkohol, yaitu dodecanol dan octanol. Proses pemurnian dilakukan melalui kombinasi distilasi dan adsorpsi dengan menggunakan silika gel sebagai adsorben. Distilasi dilakukan menggunakan kolom berkemasan (packed column) yang diisi serabut logam, sedangkan proses adsorpsi dilakukan pada kolom packed bed yang diisi silika gel. Variabel operasi yang dikaji meliputi rasio refluks pada kolom distilasi sebesar 1,36; 2,86; dan 3,00 mL/min, serta temperatur feed adsorber pada 80°C, 90°C, 100°C, dan 110°C. Jenis pelarut (dodecanol dan octanol) juga digunakan sebagai variabel untuk mengevaluasi pengaruh karakteristik pelarut terhadap kinerja pemisahan etanol.

Prosedur penelitian diawali dengan proses distilasi campuran feed pada rasio refluks yang telah ditentukan hingga diperoleh distilat dengan konsentrasi etanol tertentu. Distilat kemudian diuapkan kembali dan dialirkan ke kolom adsorpsi yang dioperasikan pada variasi temperatur yang telah ditetapkan. Pada tahap adsorpsi, uap air diharapkan teradsorpsi oleh silika gel, sementara etanol dikondensasikan sebagai produk akhir. Sampel hasil distilasi

dan adsorpsi selanjutnya dianalisis untuk menentukan konsentrasi etanol dan mengevaluasi kinerja pemisahan pada masing-masing kondisi operasi.

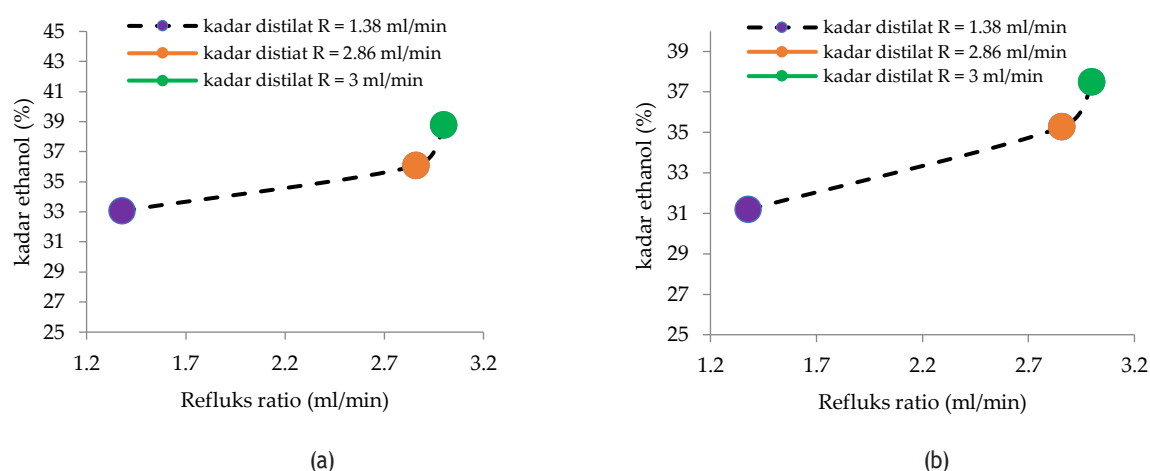
Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kemurnian etanol dari campuran pelarut berbasis alkohol dan air melalui kombinasi proses distilasi menggunakan kolom berkemasan dan adsorpsi menggunakan silika gel. Proses pemisahan dilakukan melalui tahapan optimasi rasio refluks pada distilasi serta optimasi temperatur pada proses adsorpsi.

Pengaruh Rasio Refluks terhadap Konsentrasi Etanol Hasil Distilasi

Rasio refluks merupakan salah satu parameter kunci dalam operasi kolom distilasi karena secara langsung memengaruhi intensitas kontak antara fase uap dan fase cair di dalam kolom. Pada penelitian ini, variasi rasio refluks sebesar 1,36 mL/min; 2,86 mL/min; dan 3,00 mL/min menunjukkan kecenderungan yang konsisten, yaitu semakin besar rasio refluks, semakin tinggi konsentrasi etanol yang dihasilkan pada distilat, baik untuk pelarut dodecanol maupun octanol.

Peningkatan konsentrasi etanol pada rasio refluks yang lebih besar disebabkan oleh meningkatnya jumlah distilat yang dikembalikan ke dalam kolom distilasi. Distilat yang direfluks kembali akan mengalami kontak ulang dengan uap yang naik dari reboiler, sehingga memperbaiki kesetimbangan uap-cair pada setiap ketinggian kolom. Proses ini secara efektif meningkatkan jumlah tahap kesetimbangan teoritis di dalam kolom, meskipun secara fisik kolom tidak mengalami perubahan dimensi. Akibatnya, pemisahan antara etanol dan air menjadi lebih selektif.



Gambar 1. Grafik Konsentrasi Distillate Pelarut dan Refluks Ratio; (a) Pelarut Dodecanol, (b) Pelarut Octanol

Pada rasio refluks tertinggi, yaitu 3,00 mL/min, diperoleh konsentrasi etanol maksimum sebesar 37,5% untuk pelarut dodecanol dan 38,7% untuk pelarut octanol. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi tersebut memberikan keseimbangan terbaik antara laju alir cairan turun dan laju alir uap naik di dalam kolom, sehingga proses pemisahan berlangsung lebih efisien. Sebaliknya, pada rasio refluks yang lebih rendah, jumlah cairan yang direfluks ke kolom lebih sedikit, sehingga kontak uap-cair menjadi terbatas dan pemisahan tidak berlangsung optimal.

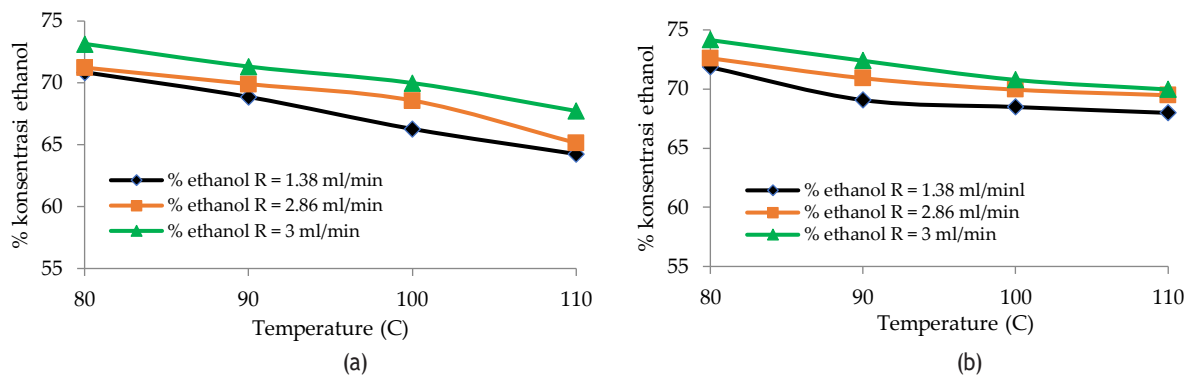
Perbedaan hasil antara penggunaan pelarut dodecanol dan octanol juga menunjukkan peran penting sifat fisik dan struktur molekul pelarut terhadap pemisahan etanol. Octanol memiliki rantai karbon yang lebih pendek (C_8) dibandingkan dodecanol (C_{12}), sehingga sifat polaritasnya lebih mendekati etanol. Kedekatan karakteristik ini menyebabkan etanol lebih mudah terdistribusi dalam sistem yang menggunakan octanol, sehingga konsentrasi etanol pada distilat menjadi lebih tinggi (Schahl et al., 2020). Hasil ini sejalan dengan teori bahwa kesesuaian struktur molekul antar komponen akan memengaruhi efisiensi pemisahan dalam sistem distilasi berbasis pelarut.

Pengaruh Suhu Adsorpsi terhadap Konsentrasi Etanol

Tahap adsorpsi dilakukan sebagai proses lanjutan untuk meningkatkan kemurnian etanol hasil distilasi. Variasi temperatur yang diterapkan pada kolom adsorpsi bertujuan untuk menentukan kondisi optimum di mana selektivitas

pemisahan antara etanol dan air berlangsung paling efektif. Berdasarkan hasil penelitian, konsentrasi etanol tertinggi diperoleh pada temperatur adsorpsi 80°C, baik untuk sistem dengan pelarut dodecanol maupun octanol.

Fenomena ini dapat dijelaskan berdasarkan perbedaan titik didih komponen utama dalam sistem. Etanol memiliki titik didih sekitar 78°C, sedangkan air memiliki titik didih 100°C. Pada temperatur adsorpsi 80°C, sebagian besar etanol berada dalam fase uap dan dapat melewati kolom adsorpsi, sementara sebagian besar air masih berada dalam fase cair atau uap dalam jumlah yang terbatas. Kondisi ini memungkinkan silika gel bekerja secara optimal dalam menyerap uap air yang ikut terbawa, sehingga konsentrasi etanol pada produk meningkat secara signifikan (Zhu et al., 2017).



Gambar 2. Grafik Konsentrasi Ethanol dengan Temperature pada Pelarut; (a) Pelarut Dedocanol, (b) Pelarut Octanol

Ketika temperatur adsorpsi dinaikkan di atas 80°C, konsentrasi etanol yang dihasilkan justru mengalami penurunan. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya fraksi uap air yang ikut masuk ke kolom adsorpsi seiring kenaikan temperatur. Pada kondisi tersebut, silika gel cenderung lebih cepat jenuh oleh air, sehingga kapasitas adsorpsi efektif terhadap uap air menurun. Selain itu, pada temperatur yang lebih tinggi, etanol dan air sama-sama berada dalam fase uap, sehingga selektivitas pemisahan menjadi berkurang (Dyartanti et al., n.d.).

Hasil ini menunjukkan bahwa temperatur adsorpsi yang terlalu tinggi tidak selalu menguntungkan, meskipun dapat meningkatkan laju perpindahan massa. Oleh karena itu, pemilihan temperatur adsorpsi harus mempertimbangkan keseimbangan antara volatilitas komponen dan kapasitas adsorpsi adsorben.

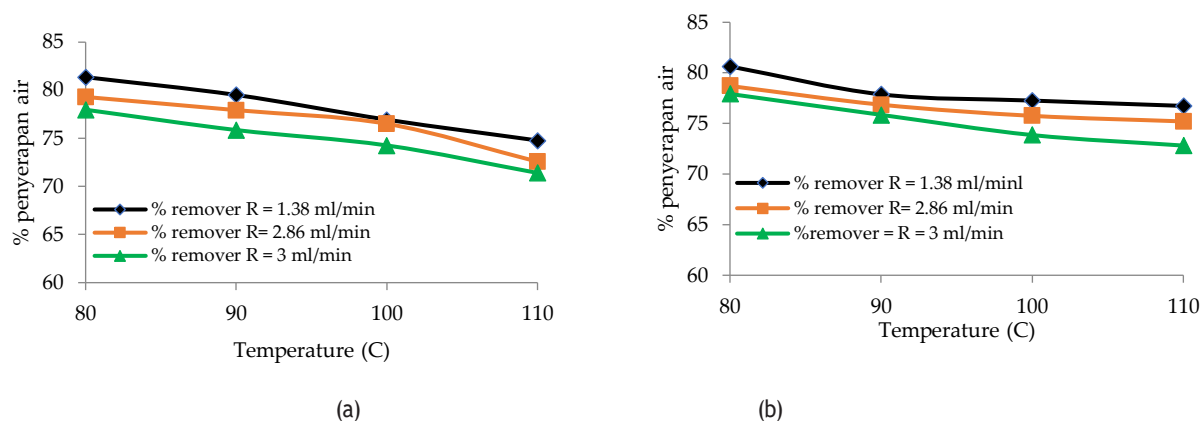
Pengaruh Temperatur terhadap Persentase Penyerapan Air oleh Silika Gel

Adsorpsi air oleh silika gel merupakan mekanisme utama dalam peningkatan kemurnian etanol pada penelitian ini. Silika gel dikenal memiliki afinitas tinggi terhadap molekul air karena keberadaan gugus silanol ($-\text{Si}-\text{OH}$) pada permukaannya yang dapat membentuk ikatan hidrogen dengan molekul air. Namun, kemampuan adsorpsi ini sangat dipengaruhi oleh temperatur operasi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa persentase penyerapan air tertinggi terjadi pada temperatur adsorpsi 80°C, dengan nilai maksimum mencapai 81,3% pada sistem menggunakan pelarut dodecanol. Seiring dengan peningkatan temperatur, persentase penyerapan air mengalami penurunan yang cukup signifikan untuk semua variasi rasio refluks.

Penurunan kemampuan adsorpsi ini dapat dijelaskan berdasarkan sifat adsorpsi yang bersifat eksotermik. Pada temperatur rendah hingga menengah, energi kinetik molekul air relatif rendah sehingga gaya tarik antara adsorben dan adsorbat dapat bekerja secara efektif (Mahajan & Jadhav, n.d.). Namun, ketika temperatur meningkat, energi kinetik molekul air menjadi lebih besar, sehingga molekul air cenderung terlepas kembali dari permukaan silika gel. Kondisi ini menyebabkan terjadinya desorpsi parsial, yang menurunkan efisiensi penyerapan air secara keseluruhan.

Selain itu, pada temperatur tinggi, silika gel yang telah menyerap air juga berpotensi mengalami penguapan air yang telah teradsorpsi. Hal ini semakin memperkuat alasan mengapa peningkatan temperatur tidak selalu meningkatkan kinerja adsorpsi, bahkan dapat berdampak sebaliknya. Dengan demikian, hasil penelitian ini menegaskan bahwa temperatur adsorpsi harus dijaga pada rentang optimum agar silika gel dapat bekerja secara maksimal (Shen et al., 2021).



Gambar 2. Grafik % Penyerapan Air Dengan Temperature Pada Pelarut; (a) Pelarut Dedocanol, (b) Pelarut Octanol

Optimasi Terintegrasi Proses Distilasi dan Adsorpsi

Optimasi keseluruhan proses pemisahan etanol dilakukan dengan mempertimbangkan tidak hanya konsentrasi etanol yang dihasilkan, tetapi juga laju produksi dan kebutuhan energi. Berdasarkan hasil perhitungan energi, temperatur adsorpsi 80°C memerlukan energi terbesar per satuan volume etanol yang dihasilkan. Hal ini disebabkan oleh laju produksi etanol yang relatif lebih rendah pada kondisi tersebut, meskipun kemurnian etanol yang diperoleh paling tinggi (Dhaniswara et al., 2016).

Temuan ini menunjukkan adanya kompromi antara kualitas produk dan efisiensi energi. Kondisi operasi yang menghasilkan etanol dengan kemurnian tinggi belum tentu merupakan kondisi yang paling efisien secara energi. Oleh karena itu, dalam menentukan kondisi operasi optimum, perlu dilakukan evaluasi menyeluruh yang mencakup aspek teknis dan ekonomis (Lei et al., 2014).

Berdasarkan hasil penelitian ini, kombinasi rasio refluks 3,00 mL/min pada proses distilasi dan temperatur adsorpsi 80°C dinyatakan sebagai kondisi terbaik untuk menghasilkan etanol dengan konsentrasi tinggi. Kombinasi ini memberikan kinerja pemisahan yang paling efektif, meskipun masih terdapat peluang untuk optimasi lebih lanjut, khususnya dalam menekan konsumsi energi. Dengan demikian, integrasi proses distilasi dan adsorpsi terbukti mampu meningkatkan kemurnian etanol secara signifikan dan berpotensi dikembangkan untuk aplikasi skala yang lebih besar.

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi proses distilasi menggunakan kolom berkemasan dan adsorpsi menggunakan silika gel efektif dalam meningkatkan kemurnian etanol dari campuran solvent berbasis alkohol dan air. Peningkatan rasio refluks pada proses distilasi berpengaruh langsung terhadap kenaikan konsentrasi etanol, dengan rasio refluks optimum sebesar 3,00 mL/min menghasilkan kadar etanol tertinggi. Selain itu, penggunaan pelarut octanol memberikan hasil pemisahan yang lebih baik dibandingkan dodecanol, yang dikaitkan dengan perbedaan panjang rantai karbon dan kesesuaian sifat fisik pelarut terhadap etanol.

Pada tahap adsorpsi, temperatur operasi berperan penting dalam menentukan kinerja pemurnian etanol. Temperatur adsorpsi 80°C merupakan kondisi optimum yang menghasilkan konsentrasi etanol tertinggi sekaligus persentase penyerapan air terbesar oleh silika gel. Peningkatan temperatur di atas kondisi tersebut menyebabkan penurunan efisiensi adsorpsi akibat berkurangnya afinitas adsorben terhadap air dan meningkatnya kecenderungan desorpsi. Secara keseluruhan, kombinasi rasio refluks 3,00 mL/min dan temperatur adsorpsi 80°C merupakan kondisi terbaik untuk memperoleh etanol dengan kemurnian tinggi, meskipun masih diperlukan kajian lanjutan untuk meningkatkan efisiensi energi proses.

Konflik Kepentingan

Tidak ada potensi konflik kepentingan yang relevan dengan artikel ini.

Daftar Pustaka

- Blanchard, L. A., Gu, Z., & Brennecke, J. F. (2001). High-pressure phase behavior of IL/CO₂ systems. *J. Phys. Chem. B.*, 105, 2437.
- Cui, P., Yu, M., Liu, Z., Zhu, Z., & Yang, S. (2019). Energy, exergy, and economic (3E) analyses and multi-objective optimization of a cascade absorption refrigeration system for low-grade waste heat recovery. *Energy Convers. Manage.*, 184, 249.
- Dhaniswara, T. K., Widjaja, T., Kimia, T., & Kimia, T. (2016). *Pengaruh Porositas Packing Steel Wool Terhadap Pressure Drop Didalam Packed Bed Column Pada Distilasi Campuran Etanol-Amil-Alkohol-Air*. 2(1).
- Dyartanti, E. R., Kusumastuti, D., Aufar, I. M., & Kimia, J. (n.d.). *Etanol Fuel Grade Dengan Metode Adsorpsi Dalam Kolom Unggun Tetap Menggunakan Adsorben Cao-Zeolit Granular*. 11(1), 31–34.
- Kleizen, H. H. (2006). Conceptual chemical process design in a sustainable technological world. *J. Cleaner Prod.*, 14, 924.
- Lei, Z., Dai, C., Zhu, J., & Chen, B. (2014). Extractive distillation with ionic liquids: A review. *AIChE J.*, 60, 3312.
- Li, H., Sun, G. L., Li, D. Y., Xi, L., & Zhou, P. (2021). Molecular interaction mechanism in the separation of a binary azeotropic system by extractive distillation with IL. *Green. Energy Environ.*, 6, 329.
- Li, R., Cui, X., Wu, T., Feng, T., & Zhang, Y. (2013). Selection of IL solvent for liquid-liquid extraction based on COSMO-SAC model. *J. Chem. Thermodyn.*, 64, 452.
- Mahajan, Y. S., & Jadhav, H. R. (n.d.). *Use of membrane distillation for selective recovery of chemicals like ethyl alcohol: a critical review. Chemical Product and Process Modeling*. <https://doi.org/doi:10.1515/cppm-2025-0023>
- Mullins, E., Oldland, R., Liu, Y. A., Wang, S., Sandler, S. I., Chen, C. C., Zwolak, M., & Seavey, K. C. (2006). Sigma-profile database for using COSMO-based thermodynamic methods. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 45, 4389.
- Schahl, A., Reat, V., & Jolibois, F. (2020). Structures and NMR spectra of short amylose-lipid complexes. Insight using molecular dynamics and DFT quantum chemical calculations. *Carbohydr. Polym.*, 235, 115846.
- Shen, Y., Chen, Z., Qi, H., Ma, Z., Dai, Y., Zhao, Q., Zhu, Z., Ma, Y., & Wang, Y. (2021). Mechanism analysis of extractive distillation for separation of acetic acid and water based on quantum chemical calculation and molecular dynamics simulation. *J. Mol. Liq.*, 332, 115866.
- Yang, H. L. (2004). Recovery and using of ethanol-cyclohexane waste liquid during the experiment. *Chem. Eng.*, 3, 53.
- Zhu, Z., Ri, Y., Jia, H., Li, X., Wang, Y., & Wang, Y. (2017). Process evaluation on the separation of ethyl acetate and ethanol using extractive distillation with ionic liquid. *Sep. Purif. Technol.*, 181, 44.