



Pengaruh Penambahan Packing pada Performa Tray Column: Studi Simulasi CFD

Muhammad Husin Haykal, Fadlilatul Taufany, Ali Altway

Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia

Email: hekalhafes@gmail.com, f_taufany@chem-eng.its.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini melakukan studi simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) untuk menganalisis hidrodinamika dan perpindahan massa pada kolom distilasi, dengan fokus pada dampak penambahan packing jenis steel wool pada sieve tray. Kolom distilasi jenis tray column sering digunakan, namun memiliki kelemahan berupa efisiensi pemisahan yang rendah dan pressure drop yang tinggi akibat distribusi aliran yang tidak merata. Sebagai solusi, modifikasi kolom dengan penambahan packing di atas sieve tray telah terbukti mampu meningkatkan perpindahan massa dan efisiensi tray. Studi ini menggunakan model multifase Eulerian, model turbulensi k-epsilon, dan model species transport untuk memodelkan sistem biner etanol-air. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan packing steel wool menciptakan gelembung yang lebih kecil dan lebih merata, sehingga meningkatkan interfacial area (area kontak antar fase) dan waktu kontak antara uap dan cairan. Hal ini menghasilkan aliran gas yang lebih terstruktur dan peningkatan konsentrasi uap etanol yang keluar dari tray, yang mengindikasikan efisiensi pemisahan yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan sieve tray saja. Penelitian ini memberikan pemahaman mendalam tentang fenomena fisik internal yang mendukung peningkatan kinerja kolom distilasi dengan penambahan packing.

Kata kunci: bioetanol, CFD, distilasi, packing, tray column

ABSTRACT

This study conducted a Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation to analyze the hydrodynamics and mass transfer in a distillation column, focusing on the impact of adding steel wool packing on a sieve tray. Tray columns are commonly used in distillation processes but have drawbacks such as low separation efficiency and high pressure drop due to uneven flow distribution. As a solution, modifying the column by adding packing above the sieve tray has been proven to enhance mass transfer and tray efficiency.

The study employed a multiphase Eulerian model, the k-epsilon turbulence model, and the species transport model to simulate a binary ethanol-water system. The simulation results show that the addition of steel wool packing produces smaller and more uniform bubbles, thereby increasing the interfacial area and the contact time between vapor and liquid. This leads to a more structured gas flow and a higher ethanol vapor concentration at the tray outlet, indicating improved separation efficiency compared to using sieve trays alone. This research provides an in-depth understanding of the internal physical phenomena that support the performance enhancement of distillation columns through the addition of packing.

Keywords: bioethanol, CFD, distillation, packing, tray column

PENDAHULUAN

Perkembangan infrastruktur, industri, dan transportasi telah menyebabkan penurunan kualitas udara secara signifikan, menjadi tantangan serius di Indonesia (Womal, 2023). Salah satu sumber utama polusi udara adalah emisi gas CO dari kendaraan bermotor, yang menyumbang sekitar 90% dari total emisi CO. Sektor transportasi diprediksi akan terus meningkatkan emisi CO sebesar 7% per tahun.

Menanggapi hal ini, pemerintah Indonesia berkomitmen untuk mencapai net zero emission pada tahun 2060 (Purnomoasri & Handayani, 2022).

Bioetanol menjadi salah satu solusi bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan karena kandungan oksigennya dan kemampuannya mengurangi emisi gas rumah kaca. Penggunaan campuran etanol dan bensin seperti ethyl tertiary butyl ether (ETBE) yang mengandung 45% per volume bioetanol dan 55% per volume isobutilena, sebagai campuran pada bensin maupun octane booster terbukti dapat mengurangi emisi karbon hingga 40% dibandingkan bahan bakar fosil (Bušić et al., 2018). Di Indonesia, permintaan bioetanol terus meningkat, sejalan dengan proyeksi pertumbuhan permintaan bensin dan kebijakan pemerintah (Mayasari & Dalimi, 2018).

Tantangan utama dalam produksi bioetanol adalah proses pemurnian untuk mencapai kadar fuel grade, terutama karena adanya titik azeotrop pada campuran etanol-air (Poling et al., 2001). Sistem etanol-air membentuk azeotrop pada komposisi 89,4 mol% etanol, yang membuatnya tidak dapat dimurnikan lebih lanjut hanya dengan distilasi biasa (Kumar et al., 2010). Kolom distilasi jenis tray column sering digunakan, namun memiliki kelemahan berupa efisiensi pemisahan yang rendah dan pressure drop yang tinggi akibat distribusi aliran yang tidak merata. Di sisi lain, packed column memiliki pressure drop yang lebih rendah, namun seringkali tidak memanfaatkan seluruh volume kolom secara optimal (Towler & Sinnott, 2013) (Van Winkle, 1967).

Sebagai solusi, modifikasi kolom dengan konsep menambahkan packing di atas sieve tray, telah terbukti mampu meningkatkan perpindahan massa dan efisiensi tray (tray efficiency). Penambahan packing menciptakan gelembung yang lebih kecil, sehingga meningkatkan area kontak antar fase (interfacial area) dan waktu kontak uap-cair (Ramadani et al., 2019). Hal ini dapat menjaga diameter gelembung tetap kecil, sehingga nilai perpindahan massa di setiap tray terjaga dan berpotensi menghasilkan kadar distilat yang lebih tinggi.

Efisiensi Murphee akan meningkat karena dengan penambahan packing meningkatkan kontak antara cairan dan uap, memecah gelembung-gelembung yang besar sehingga meningkatkan interfacial area. Surface tension juga ikut menurun seiring dengan semakin kecilnya ukuran gelembung-gelembung pada froth (Spagnolo & Chuang, 1984). Selain itu, penggunaan packed sieve tray pada proses distilasi dapat menjaga diameter gelembung. Sehingga nilai mass transfer yang ada di setiap tray tetap terjaga. Dengan menjaga kondisi diameter gelembung pada setiap tray dapat menghasilkan kadar distilat yang melewati titik azeotrop pada sistem etanol-air (Xu et al., 1996).

Meskipun studi eksperimental telah menunjukkan potensi tersebut, data rinci mengenai fenomena fisik internal seperti distribusi aliran dan pola perpindahan massa masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini memanfaatkan simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) untuk menganalisis fenomena tersebut secara mendalam.

Di Indonesia, penurunan kualitas udara akibat emisi CO dari sektor transportasi—yang menyumbang hingga 90% dari total emisi—menjadi masalah lingkungan utama (Purnomoasri & Handayani, 2022). Untuk meredam dampak ini, bioetanol sebagai bahan bakar alternatif menjadi solusi penting karena kandungan oksigennya dan potensi pengurangan emisi hingga 40% bila digunakan sebagai ETBE (Bušić et al., 2018; Mayasari & Dalimi, 2018). Namun, tantangan terbesar dalam produksi bioetanol berkualitas bahan bakar adalah mengatasi titik azeotrop etanol-air pada 89,4 mol%—yang tidak dapat dipisahkan hanya dengan distilasi konvensional (Poling et al., 2001; Kumar et al., 2010).

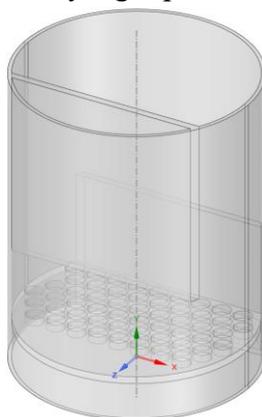
Beberapa peneliti telah mengevaluasi modifikasi kolom distilasi untuk meningkatkan efisiensi pemisahan bioetanol. Ramadani et al. (2019) melakukan studi eksperimen dan simulasi terhadap

penggunaan packed sieve tray pada kolom distilasi batch ethanol-water. Hasilnya menunjukkan peningkatan persen distilat sebesar 8,89 % (pada 3 cm packing) hingga 23,31 % (pada 5 cm packing), serta penurunan diameter gelembung dan kenaikan massa transfer. Fadlilatul Taufany et al. (2015) juga menunjukkan peningkatan kemurnian etanol hingga 99,5 % dengan strategi packing baja wol pada setiap tray. Meski demikian, kedua studi ini masih menggunakan pendekatan batch dan hanya menitikberatkan pada aspek eksperimen; analisis dalam skala kontinu dan distribusi internal aliran serta pengaruh pola massa transfer belum dibahas.

Tujuan penelitian ini adalah mengidentifikasi karakteristik aliran fluida dan massa transfer pada kolom packed sieve tray dengan menggunakan CFD, serta menilai bagaimana desain packing—seperti dimensi dan material—mempengaruhi efisiensi distilasi bioetanol. Manfaat penelitian ini adalah penyediaan panduan teknis untuk perancangan kolom distilasi kontinu yang lebih efisien, mendukung pengembangan industri bioetanol yang berorientasi pada kualitas fuel grade, dan sejalan dengan komitmen Indonesia terhadap net zero emission 2060.

METODE PENELITIAN

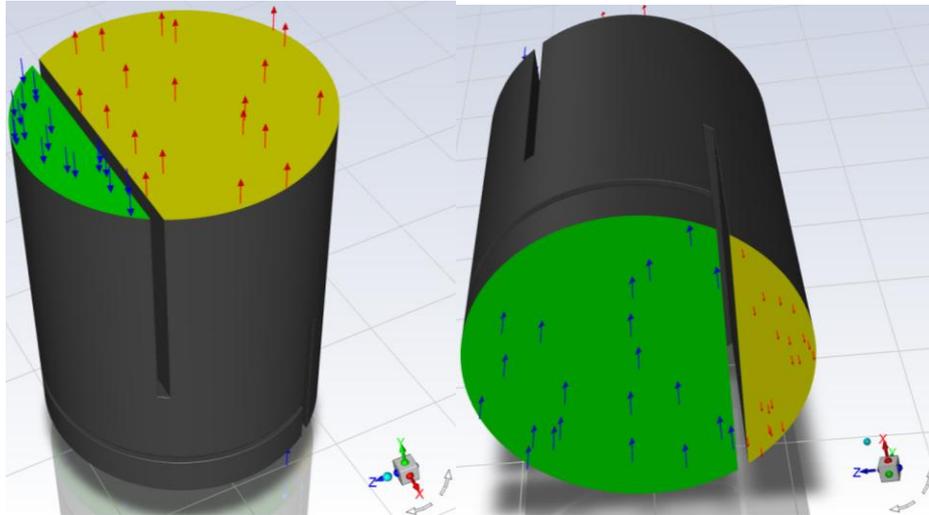
Penelitian ini menggunakan metode simulasi dinamika fluida komputasi (CFD) untuk menganalisis aliran dalam kolom distilasi. Dua variasi geometri tiga dimensi—meliputi kolom tanpa *packing*, dan *packing* jenis *steel wool* setebal 3 cm dibuat. Sistem kolom distilasi pada simulasi ini adalah sistem biner etanol-air, dan geometri *tray* disesuaikan dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Taufany, 2015. Geometri yang sudah dibuat kemudian didiskritisasi menggunakan proses *meshing*. Simulasi dijalankan menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent dengan mengaplikasikan model multi fase Eulerian, model turbulensi k-epsilon ($k-\epsilon$) tipe standar, dan model *species transport*. Properti material dan kondisi batas didefinisikan sesuai kondisi operasi, selanjutnya simulasi dijalankan dalam mode transien (*transient*) menggunakan *solver* berbasis tekanan (*pressure-based*) dengan percepatan gravitasi diatur pada $-9,8 \text{ m/s}^2$ di sumbu y. Data simulasi yang diperoleh lalu akan diolah.



Gambar 1. Geometri dari Sieve Tray

Solusi numerik dari persamaan kontinuitas, momentum, dan perpindahan massa spesies hanya dapat diperoleh setelah *boundary condition* yang relevan diterapkan. Spesifikasi kondisi batas ini diperlukan untuk semua domain, baik yang berada di sisi eksternal maupun internal dari geometri fluida yang ditinjau. *Inlet*, kecepatan aliran gas dan cairan ditentukan dengan

mengasumsikan bahwa masing-masing fase (gas dan cairan) sepenuhnya mengisi area masuk, yaitu fraksi volumenya bernilai 1. *Output* untuk fase cair dan uap ditetapkan menggunakan *boundary condition outflow* dengan kecepatan tegak lurus. Aliran pada *outlet* cairan diasumsikan hanya mengeluarkan fase cair, sedangkan *outlet* uap hanya mengeluarkan fase gas, sama seperti halnya dengan *inlet*.



Gambar 2. Diagram Skematis Sieve Tray dengan Boundary Condition (kiri: inlet, kanan: outlet)

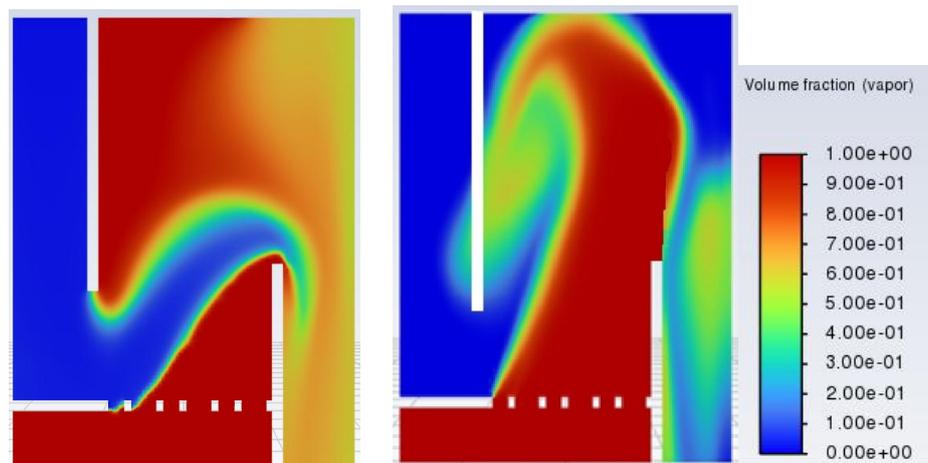
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada tahap simulasi ini, geometri kolom distilasi dibuat menggunakan Ansys SpaceClaim dengan mempertimbangkan desain aktual dari alat kolom distilasi. Desain sieve tray disesuaikan dengan spesifikasi tray pada penelitian yang dilakukan oleh Taufany, 2015 (Taufany, Soewarno, et al., 2015). Model geometri mencakup tray, weir, downcomer, dan packing, yang akan digunakan dalam simulasi hidrodinamika fluida di dalam kolom distilasi. Pembuatan geometri merupakan tahap awal yang diperlukan sebagai tempat yang mewakili kondisi fisik sebenarnya dari kolom distilasi aktual. Pada simulasi CFD, proses meshing dilakukan untuk membagi geometri objek kerja menjadi elemen-elemen diskrit, sehingga memungkinkan analisis numerik yang lebih efektif. Kualitas meshing yang sesuai dengan bentuk geometri sangat berpengaruh terhadap akurasi dan keandalan hasil simulasi. Pemilihan ukuran serta jenis elemen dalam meshing memiliki dampak langsung terhadap presisi simulasi. Oleh karena itu, proses meshing yang optimal menjadi faktor krusial dalam memperoleh hasil simulasi yang akurat dan dapat dipercaya. Mesh dari geometri ini dibuat menggunakan Ansys Mesh.

Tabel 1. Jumlah Elemen Mesh pada Setiap Tipe Tray

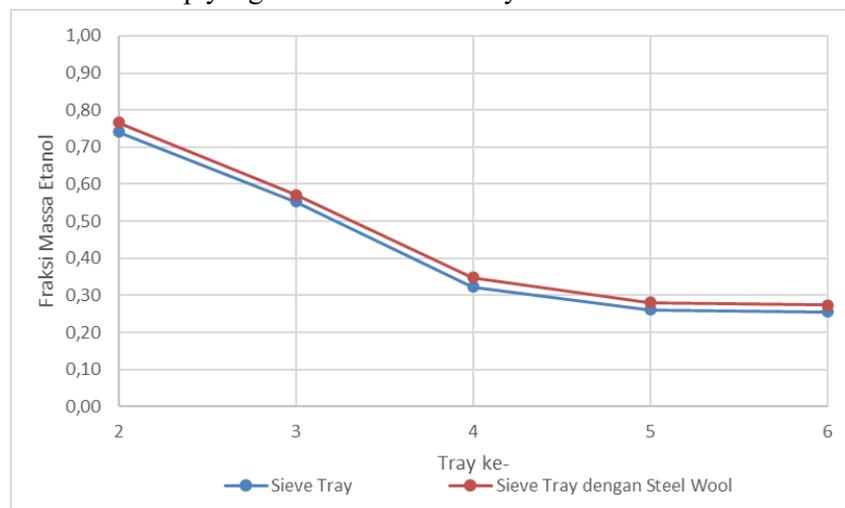
| No. | Tipe Tray | Jumlah Elemen Mesh |
|-----|--------------------|--------------------|
| 1. | Tanpa Packing | 970.119 |
| 2. | Packing Steel Wool | 1.069.706 |

Hasil *meshing* yang dihasilkan menunjukkan bahwa semakin banyak komponen yang ada pada geometri, maka jumlah elemen *mesh* yang dihasilkan akan semakin banyak, dan dengan semakin banyaknya elemen *mesh*, hasil simulasi dengan Ansys *Fluent* akan semakin akurat.



Gambar 3. Kontur Aliran Fase Gas di Dalam Tray (Kiri: Sieve Tray dengan packing steel wool, Kanan: Sieve Tray)

Berdasarkan Gambar 3. dapat dilihat bahwa persebaran aliran fluida mengalir seperti aliran kolom distilasi pada umumnya dan tidak terjadi flooding maupun weeping yang menunjukkan bahwa model dan geometri dari kolom sudah cukup akurat. Perbedaan yang mencolok adalah aliran gas pada sieve tray yang diberi packing steel wool. Aliran gas jauh lebih terstruktur dibandingkan menggunakan sieve tray saja. Hal ini disebabkan karena penambahan packing steel wool berfungsi sebagai penghalang dan distributor aliran. Energi kinetik dari uap secara efektif diredam dan disebar ke seluruh volume packing (Roshdi et al., 2013). Hasil simulasi juga meninjau konsentrasi pemisahan etanol air yang terjadi pada setiap tray nya untuk melihat apakah penambahan packing steel wool di atas sieve tray mempengaruhi konsentrasi uap yang keluar dari sieve tray.

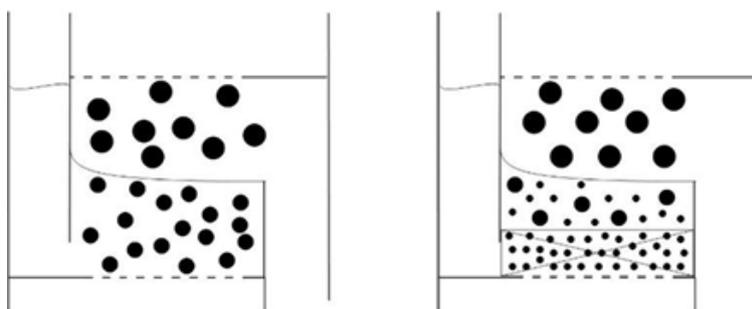


Gambar 4. Konsentrasi Uap Melewati Tray pada Sieve Tray dan Sieve Tray dengan tambahan Packing Steel Wool

Grafik pada Gambar 4. Menunjukkan bahwa penambahan packing di atas tray mampu meningkatkan konsentrasi uap etanol yang keluar dari tray. Hal ini sesuai dengan penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya, bahwa penambahan packing akan menyebabkan perluasan *Interfacial area* di mana total luas permukaan kontak pertukaran massa antara fase cair dan

fase gas di dalam kolom akan semakin besar dengan adanya penambahan *packing* (Chen et al., 1992). Dengan adanya penambahan *packing*, Interaksi antara cairan dan uap akan meningkat karena gelembung-gelembung yang melewati *packing* cenderung pecah menjadi lebih kecil dan lebih merata. Hal ini menyebabkan terbentuknya *froth* ketika gelembung bertemu dengan cairan yang mengalir dari *downcomer*. Semakin tinggi *froth* yang terbentuk, durasi kontak antara kedua fase pun semakin panjang. Dengan meningkatnya *interfacial area*, efisiensi proses juga akan mengalami peningkatan (Taufany, Putra, et al., 2015).

Pada proses distilasi di dalam *tray column*, terbentuk gelembung akibat kontak antara uap dan cairan. Jika dibandingkan model hidroliknya, gelembung yang terbentuk pada *sieve tray* lebih besar dan lebih sedikit jika dibandingkan setelah ditambahkan *packing steel wool* yang diilustrasikan pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Model Hidrolik Dispersi Gelembung (kiri: Sieve Tray, kanan: Sieve Tray dengan Packing Steel Wool)

Hal ini disebabkan karena gelembung secara konsisten dipecah oleh *packing* dan tidak menyatu kembali sehingga semakin besar *interfacial area* yang terbentuk akan menghasilkan diameter gelembung yang kecil. Hal ini menyebabkan meningkatkan *interfacial area* dan waktu kontak antara vapor dan liquid yang ada di setiap tray. Sehingga hasil kadar etanol yang didapatkan dengan penambahan *packing steel wool* lebih besar daripada hanya dengan menggunakan *sieve tray* saja (Ramadani et al., 2019).

SIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa penambahan *packing steel wool* pada *sieve tray* dalam kolom distilasi dapat meningkatkan kinerja pemisahan etanol-air. Simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) menunjukkan bahwa *packing steel wool* berperan sebagai penghalang dan distributor aliran, sehingga menghasilkan aliran gas yang lebih terstruktur dibandingkan dengan hanya menggunakan *sieve tray* saja. Penambahan *packing* ini secara efektif meredam energi kinetik uap dan menyebarkannya ke seluruh volume *packing*.

Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa penambahan *packing* mampu meningkatkan konsentrasi uap etanol yang keluar dari tray. Hal ini disebabkan oleh perluasan *interfacial area*, yaitu total luas permukaan kontak pertukaran massa antara fase cair dan fase gas, serta peningkatan interaksi antara cairan dan uap karena gelembung-gelembung yang melewati *packing* cenderung pecah menjadi lebih kecil dan merata. Pembentukan *froth* yang lebih tinggi

akibat pecahnya gelembung meningkatkan durasi kontak antara kedua fase, dan diameter gelembung yang lebih kecil secara konsisten dipecah oleh packing dan tidak menyatu kembali. Peningkatan interfacial area dan waktu kontak antara uap dan cairan ini menghasilkan kadar etanol yang lebih tinggi dibandingkan dengan hanya menggunakan sieve tray.

DAFTAR PUSTAKA

- Womal, A. M. (2023). Kajian Pengaruh Pembangunan Smelter Nikel di Wilayah Ekonomi Khusus Provinsi Sulawesi Tenggara. *Jurnal Ilmiah Lingkungan Kebumian*, 5(1), 15. <https://doi.org/10.31315/jilk.v5i1.6832>
- Bušić, A., Mardetko, N., Kundas, S., Morzak, G., Belskaya, H., Šantek, M. I., Komes, D., Novak, S., & Šantek, B. (2018). Bioethanol production from renewable raw materials and its separation and purification: A review. *Food Technology and Biotechnology*, 56(3), 289–311. <https://doi.org/10.17113/ftb.56.03.18.5546>
- Chen, G. X., Chuang, K. T., Chien, C., & Ye, Y. (1992). Mass transfer and hydraulics of packed sieve trays. *Gas Separation & Purification*, 6(4), 207–213. [https://doi.org/10.1016/0950-4214\(92\)80024-D](https://doi.org/10.1016/0950-4214(92)80024-D)
- Jafari, A., Mousavi, S. M., Motesaffi, H., Roohian, H., & Hamed, H. (2011). Simulation of Hydrodynamics and Mass Transfer in a Valve Tray Distillation Column Using Computational Fluid Dynamics Approach. In *Advanced Topics in Mass Transfer*. InTech. <https://doi.org/10.5772/15449>
- Kumar, S., Singh, N., & Prasad, R. (2010). Anhydrous ethanol: A renewable source of energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1830–1844. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.015>
- Mayasari, F., & Dalimi, R. (2018). Assessing Bioethanol Production to Fulfill Energy Demand in Indonesia Using System Dynamics Modeling. *TENCON 2018 - 2018 IEEE Region 10 Conference*, 0741–0746. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2018.8650307>
- Poling, B. E., Prausnitz, J. M., & O'Connell, J. P. (2001). *Properties of Gases and Liquids (5th Edition)*. McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780070116825>
- Purnomoasri, R. D., & Handayani, D. (2022). Analisis dan Mitigasi Emisi Gas Buang Akibat Transportasi (Studi Kasus Kabupaten Magetan). *ENVIRO: Journal of Tropical Environmental Research*, 24(1), 29. <https://doi.org/10.20961/enviro.v24i1.65043>
- Ramadani, T. A., Taufany, F., & Nurkhamidah, S. (2019). Study of packed sieve tray column in ethanol purification using distillation process. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 15(1), 69–74. <https://doi.org/10.11113/mjfas.v15n2019.936>
- Roshdi, S., Kasiri, N., Hashemabadi, S. H., & Ivakpour, J. (2013). Computational fluid dynamics simulation of multiphase flow in packed sieve tray of distillation column. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 30(3), 563–573. <https://doi.org/10.1007/s11814-012-0166-1>
- Spagnolo, D. A., & Chuang, K. T. T. (1984). Improving sieve tray performance with knitted mesh packing. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 23(3), 561–565. <https://doi.org/10.1021/i200026a026>
- Taufany, F., Putra, P. A., & Nuringtyas, R. J. (2015, October). Enhancement Concentration of Bioethanol Through Packed Sieve Tray Distillation.
-

- Taufany, F., Soewarno, N., Eliana Sutanto, M., & Raisa Girsang, I. (2015). Performance of Appended Wire Mesh Packing in Sieve Tray Distillation Column of Ethanol-Water System. *Modern Applied Science*, 9(7), 148. <https://doi.org/10.5539/mas.v9n7p148>
- Towler, G. P., & Sinnott, R. K. (2013). *Chemical engineering design: principles, practice, and economics of plant and process design* (2nd ed). Butterworth-Heinemann. http://www.123library.org/book_details/?id=44191
- Van Winkle, M. (1967). *Distillation*. McGraw-Hill. <https://books.google.co.id/books?id=DiCLAAAIAAJ>
- Xu, Z. P., Afacan, A., & Chuang, K. T. (1996). Prediction of Packed Sieve Tray Efficiency in Distillation. *Chemical Engineering Research and Design*, 74(8), 893–900. <https://doi.org/10.1205/026387696523193>



© 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY SA) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).