

ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN PENGHALANG DI DALAM *HUMIDIFIER* TERHADAP ALIRAN FLUIDA BERBASIS ANSYS FLUENT

Muhammad Surya Taris Zulwaqar¹, Eflita Yohana²*, Mohammad Tauviqirrahman²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: efnan2003@gmail.com

Abstract

Humidifier is a tool used to increase air humidity in a room or system. The addition of a membrane to the humidifier can increase evaporation efficiency and minimize condensation of water vapor mass. This study analyzes the addition of barriers to the wet air duct to determine the effect of H₂O fraction, temperature, and relative humidity on the dry air side using the Ansys Fluent simulation method. The use of the simulation method was chosen because it can show the phenomena in the humidifier. The SIMPLE method is used because it can produce good calculations on turbulent flow. There are wide variations in barriers and variations in inlet velocity on the wet air side. The results of the analysis show that adding barriers at a speed of 0 - 2.5 m / s can increase the H₂O mass fraction on the dry air side, but in some variations at a speed of 1 m / s can reduce the H₂O mass fraction on the dry air side. In addition, the addition of barriers can affect the temperature at a speed of 1 - 1.5 the average temperature increases by 0.3% but at a speed of 1.5 - 2.5 m / s the temperature tends to be flat after that the temperature increases by 0.4% in each geometry variation. While the R variation has the highest relative humidity, namely with a value of 58.59%.

Kata kunci: *ansys; membrane; humidifier; obstacle; relative humidity*

Abstrak

Humidifier merupakan alat yang digunakan untuk menambah kelembapan udara di suatu ruangan atau sistem. Penambahan *membrane* pada *humidifier* dapat menambah efisiensi penguapan dan meminimalkan kondensasi massa uap air. Penelitian ini menganalisis penambahan penghalang pada saluran udara basah untuk mengetahui pengaruh fraksi H₂O, temperatur, dan kelembapan relatif pada sisi udara kering dengan menggunakan metode simulasi Ansys Fluent. Penggunaan metode simulasi dipilih karena dapat memperlihatkan fenomena di dalam *humidifier*. Metode SIMPLE digunakan karena dapat menghasilkan perhitungan yang baik pada aliran turbulen. Terdapat variasi luas pada penghalang dan variasi kecepatan masuk pada sisi udara basah. Hasil analisis menunjukkan bahwa dengan penambahan penghalang pada kecepatan 0 – 2,5 m/s dapat meningkatkan fraksi massa H₂O pada sisi udara kering, namun di beberapa variasi pada kecepatan 1 m/s dapat menurunkan fraksi massa H₂O pada sisi udara kering. Selain itu penambahan penghalang dapat mempengaruhi temperatur pada kecepatan 1 – 1,5 temperatur rata-rata naik 0,3 % namun pada kecepatan 1,5 – 2,5 m/s temperatur cenderung mendatar setelah itu temperatur naik 0,4 % di setiap variasi geometri. Sedangkan pada variasi R memiliki kelembapan relatif yang paling tinggi yaitu dengan nilai 58,59 %.

Kata kunci: *ansys; membrane; humidifier; obstacle; relative humidity*

1. Pendahuluan

Kondisi Krisis iklim merupakan sebuah bencana terjadinya perubahan iklim yang tidak terkendali di bumi. Beberapa jenis faktor *ex-situ* seperti efek rumah kaca, penggunaan transportasi, kegiatan manufaktur, dan penebangan hutan yang tak terkendali menjadi pengaruh perubahan kondisi *in-situ* di daratan dan lautan seperti adanya gelombang panas, gelombang dingin, awan debu, awan asap, dan lain – lain [1]. Peningkatan suhu lingkungan secara tiba – tiba berbanding lurus terhadap kenaikan empat kali karbon dioksida yang ada di atmosfer sekitar 26% lebih besar daripada sensitivitas iklim dari pemanasan sementara [2]. Hal ini disebabkan karena kandungan air awan yang rendah dan cakupannya menurun lebih kuat seiring dengan pemanasan global, yang menyebabkan peningkatan penyerapan sinar matahari oleh bumi sehingga menghasilkan lebih banyak pemanasan [3]. Perubahan kondisi ini membuat manusia kehilangan kenyamanan dalam melakukan aktivitas baik di luar maupun di dalam ruangan.

Pada tahun 2022 Jerman memiliki total emisi CO₂ 19,8% dalam sektor transportasi [4]. Hal tersebut tentunya diperlukan solusi untuk mengurangi atau menghilangkan emisi tersebut. Salah satu solusi untuk mengatasi hal tersebut adalah penggunaan PEM dalam menggantikan mesin pembakaran lama. Pemeliharaan seperti pengkondisian udara perlu dilakukan guna menjaga umur PEM dan meningkatkan kinerja *proton exchange membrane* (PEM) [5],[6].

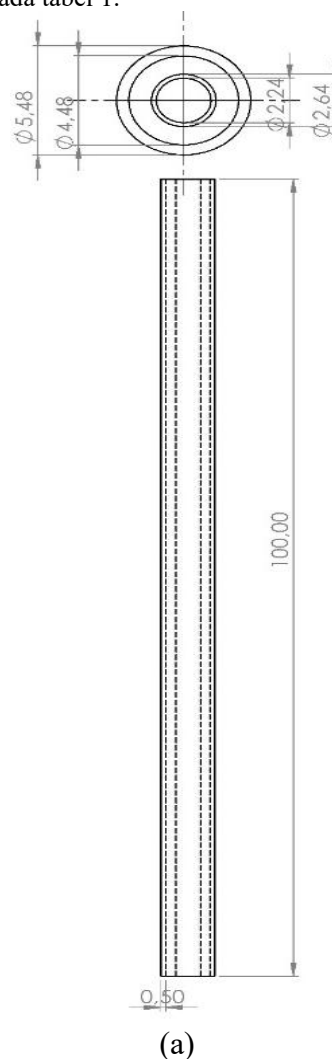
Perkembangan teknologi *humidifier* kini semakin beragam, salah satunya dengan pemanfaatan membran yang berfungsi menyerap serta menyalurkan uap air [7],[8]. Pada awalnya, teknologi membran ini banyak diaplikasikan untuk mengoptimalkan kinerja PEM [9],[10]. Namun, konsep serupa juga dapat digunakan dalam humidifier untuk ruangan, guna meningkatkan kelembaban udara secara efektif.

Penelitian ini menganalisis mengenai pengaruh modifikasi geometri membran *humidifier* yang berbentuk tabung dan tambahan penghalang pada udara basah. Simulasi fluent digunakan untuk mengamati fenomena perpindahan massa yang terjadi di dalam *humidifier* dan penggunaan simulasi dapat menekan biaya dibandingkan dengan eksperimen. Penelitian ini menggunakan variasi A, P2, Q2, dan R2 dimana terdapat perbedaan pada luas penghalang. Selain itu terdapat variasi lain berupa kecepatan inlet udara kering sebesar 1, 1.5, 2, 2.5,3 m/s.

2. Metode Penelitian

2.1 Geometri dan Mesh

Membrane *humidifier* pada penelitian berbentuk tabung dengan *inlet* udara kering berada di atas dan *inlet* udara basah berada di bawah. Alat ini dibekali dengan membran di dalamnya. Selain itu di dalam humidifier terdapat penghalang yang digunakan untuk memperbesar perpindahan massa yang terjadi di dalamnya. Penghalang diletakan di dalam membran dengan posisi 90° atau tegak lurus dengan humidifier. Bentuk geometri humidifier dapat dilihat pada Gambar 1 dan desain detail geometri dapat dilihat pada tabel 1.



Gambar 1. (a) Desain geometri *humidifier*

Tabel 1. Dimensi geometri modifikasi *humidifier*

Geometri	Dimensi
Panjang <i>Humidifier</i> , L	100 mm
Diameter <i>Humidifier</i> , D_T	6.36 mm
Diameter <i>Inlet</i> dan <i>Outlet</i> Udara Basah, D_w	4.75 mm

Diameter <i>Inlet</i> dan <i>Outlet</i> Udara Kering, D_d	3.80 mm
Diameter <i>membrane</i> , D_m	3.27 mm
Tebal <i>membrane</i> , T_m	0,5 mm
Tinggi Penghalang, H_v	0.23 mm, 0.55 mm, 0.97 mm

Struktur *mesh* pada geometri humidifier menggunakan pengaturan ukuran *body* pada setiap domain yang ada. Pengaturan ini diperdetail pada bagian membran dan domain fluida dimana ukuran *mesh* bagian tersebut diperkecil dibandingkan pada bagian lainnya. Hal ini dilakukan agar kualitas grid sesuai dengan yang dibutuhkan sehingga hasil simulasi dapat sesuai dengan keinginan. Pada jumlah elemen 765.890 menunjukkan hasil yang stabil atau baik saat dilakukan dimulasi.

2.2 Persamaan Pembangun

Penelitian ini membentuk campuran udara lembab. Untuk memodelkan campuran ini, digunakan pendekatan satu fasa serta metode transportasi spesies. Proses transportasi spesies dalam sistem ini dijelaskan menggunakan Persamaan 1.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q x_{k,q}) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{u} x_{k,q} - \alpha_q \Gamma_{k,q} \nabla x_{k,q}) = S_{Iq,k} \quad (1)$$

Dimana $x_{k,q}$ merupakan fraksi massa dari komponen k pada fase q (fasa gas). Sementara itu, $S_{Iq,k}$ merupakan interface perpindahan massa.

Selain itu terdapat persamaan proses humidifikasi, dimana memperlihatkan adanya konservasi massa yang ditunjukkan oleh persamaan 2.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot \delta x \cdot \delta y \cdot \delta z) = \frac{\partial \rho}{\partial t} (\delta x \cdot \delta y \cdot \delta z) \quad (2)$$

Selain itu, pada simulasi Ansys terdapat persamaan pembangun untuk menghitung perhitungan yang sudah disetting dapat dilihat pada persamaan 3 - 5 di bawah ini.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-\rho + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (3)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial(-\rho + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (4)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-\rho + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (5)$$

Dimana ρ adalah massa jenis fluida, F adalah gaya, $F_x = m a_x$ yang merupakan gaya pada arah x ; $m = \rho dx dy dz$; dan $a_x = \frac{Du}{Dt}$, dan S_M merupakan sumber momentum.

Penelitian ini menggunakan model turbulensi *Renormalization Group* (RNG) $k-\epsilon$, yang merupakan salah satu varian dari model $k-\epsilon$. Model ini didasarkan pada persamaan transport yang menggambarkan energi kinetik turbulen (k) serta laju disipasinya (ϵ), yang masing-masing dijelaskan melalui Persamaan (6) dan (7) di bawah ini [9].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} C_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + R_\epsilon + S_\epsilon \quad (7)$$

Dalam model ini G_k dan G_b merepresentasikan energi kinetik turbulen yang dihasilkan oleh pengaruh kecepatan aliran dan gaya buoyancy. Sementara itu Y_M menggambarkan kontribusi dilatasi fluktuatif pada turbulensi kompresibel terhadap laju disipasi. $\alpha_{k/\epsilon}$ merupakan bilangan Prandtl untuk k/ϵ , dengan S adalah *source term* UDFs. Adapun konstanta model yang digunakan antara lain: $\alpha_k = \alpha_\epsilon = 1.39$, $C_{1\epsilon} = 1.42$, $C_{2\epsilon} = 1.68$, $C_{3\epsilon} = \tanh(v/u)$, $C_\mu = 0.0845$, $\eta_0 = 4.38$, dan $\beta = 0.012$.

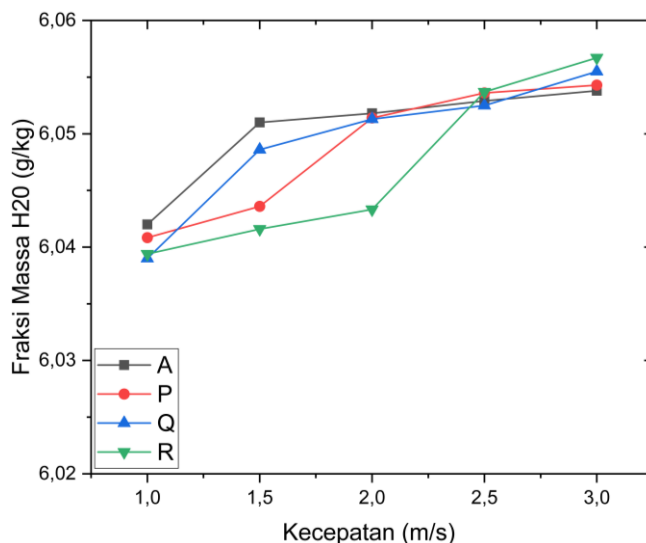
2.3 Metode Numerik

Proses simulasi numerik dilakukan secara transien dengan menerapkan metode SIMPLE sebagai metode penyelesaiannya. Pemilihan metode ini didasarkan pada kemampuannya dalam mempercepat pencapaian konvergensi, dengan batas nilai residual ditentukan sebesar 10^{-6} untuk setiap parameter dengan waktu 1 detik.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Perpindahan Massa

Penambahan penghalang pada sisi udara basah berdampak positif pada penambahan perpindahan massa di *humidifier*.



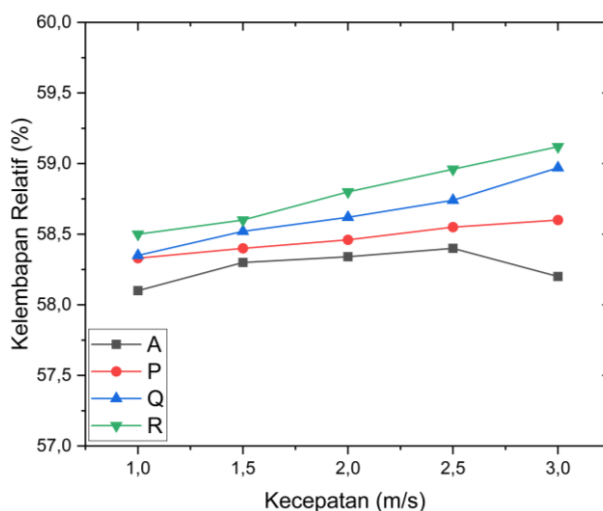
Gambar 2. Grafik Fraksi Massa H2O pada sisi udara kering di tiap kecepatan masuk udara basah

Pada Gambar 2 menunjukkan bahwa penambahan penghalang dapat menambah perpindahan fraksi massa yang masuk di udara kering. Namun penambahan kecepatan masuk pada udara basah dapat meningkatkan hasil di beberapa variasi namun juga dapat menurunkan fraksi massa H2O di beberapa variasi.

Variasi A memiliki hasil fraksi massa H2O terendah pada kecepatan masuk udara basah 3 m/s dengan nilai 6,053 g/kg, hal ini disebabkan karena pada variasi tersebut tidak ada penhalang pada sisi udara basah sedangkan pada kecepatan 1,5 m/s variasi A unggul daripada variasi lain dengan nilai fraksi massa H2O 6,051 g/kg. Sementara itu hasil tertinggi didapatkan oleh variasi R pada kecepatan udara basah masuk 3 m/s dengan nilai fraksi massa H2O 6,056 g/kg, hal ini disebabkan karena pada variasi R memiliki luas penghalang yang paling besar.

3.2 Relative Humidity

Penambahan penghalang dapat mempengaruhi hasil kelembapan relatif pada *humidifier* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Kelembapan relatif pada sisi udara kering di tiap kecepatan masuk udara basah

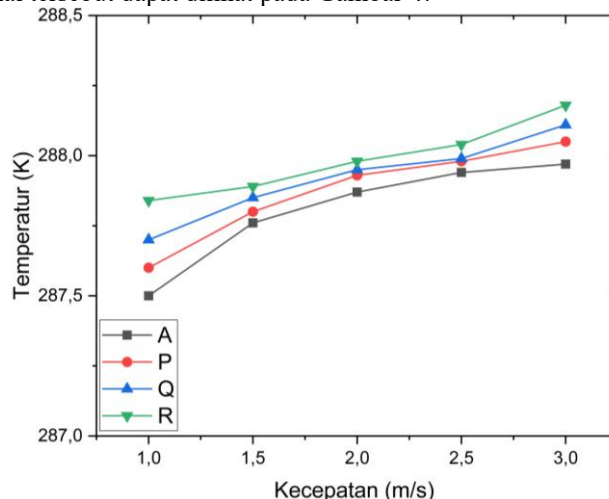
Gambar 3 menunjukkan pengaruh penambahan penghalang dan variasi kecepatan masuk udara basah terhadap kelembapan relatif pada *humidifier*. Penambahan penghalang menunjukkan dapat menambah kelembapan relatif seiring bertambahnya kecepatan masuk pada udara basah

Pada Gambar 3 menunjukkan rata-rata hasil kelembapan relatif terendah dimiliki oleh variasi A dengan nilai 58,2 %, variasi ini mendapatkan nilai terendah karena pada variasi ini tidak dapat penhalang pada sisi udara basah sehingga perpindahan air dari udara basah ke udara kering lebih sedikit. Sementara itu variasi R memiliki kelembapan relatif yang

tinggi tiap kecepatan masuk udara basah dengan nilai rata-rata 58,59 %, hal ini disebabkan karena penambahan penghalang dapat meningkatkan perpindahan air dari udara basah ke kering sehingga kelembapan relatif dapat meningkat juga.

3.3 Temperatur

Penambahan penghalang dapat meningkatkan temperatur pada sisi udara kering dengan penambahan kecepatan masuk pada sisi udara basah, hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Temperatur pada sisi udara kering di tiap kecepatan masuk udara basah

Pada Gambar 4 menunjukkan peningkatan temperatur seiring bertambahnya kecepatan masuk pada sisi udara basah dan besar penghalang pada udara basah. Pada kecepatan 1 – 1,5 temperatur rata-rata naik 0,3 % namun pada kecepatan 1,5 – 2,5 m/s temperatur cenderung mendatar setelah itu temperatur naik 0,4 % di setiap variasi geometri.

Variasi R memiliki hasil temperatur yang tinggi pada sisi udara kering dimana nilai rata – rata temperatur mencapai 287,98 K, hal ini disebabkan karena terdapat penambahan penghalang pada variasi tersebut. Sedangkan pada variasi A memiliki nilai rata – rata temperatur yang paling rendah dibandingkan dengan variasi lainnya dengan nilai rata – rata temperatur 287,5 K, hal ini disebabkan karena pada variasi tersebut tidak ada penghalang aliran di sisi udara basah.

4. Kesimpulan

Berdasarkan analisis hasil pembahasan dan analisis simulasi ini dapat disimpulkan bahwa dengan menambahkan penghalang pada kecepatan 0 – 2,5 m/s dapat meningkatkan fraksi massa H₂O pada sisi udara kering, namun di beberapa variasi pada kecepatan 1 m/s dapat menurunkan fraksi massa H₂O pada sisi udara kering. Variasi R memiliki fraksi massa H₂O tertinggi dibandingkan dengan variasi lainnya. Selain itu penambahan penghalang pada *humidifier* dapat meningkatkan temperatur dan kelembapan relatif di sisi udara kering.

5. Daftar Pustaka

- [1] Article R, Reddy SJ. Journal of Agriculture and Aquaculture A note on: “Climate Change/Global Warming versus Climate Crisis.” vol. 3. 2021.
- [2] Armour KC. Energy budget constraints on climate sensitivity in light of inconstant climate feedbacks. Nat Clim Chang 2017;7:331–5. <https://doi.org/10.1038/nclimate3278>.
- [3] Zelinka MD, Myers TA, McCoy DT, Po-Chedley S, Caldwell PM, Ceppi P, et al. Causes of Higher Climate Sensitivity in CMIP6 Models. Geophys Res Lett 2020;47. <https://doi.org/10.1029/2019GL085782>.
- [4] Kreitmair M, Schoenfeld L, Frank M, Klein H, Rehfeldt S. Experimental investigation of the impact of composite membranes and novel spacer designs on membrane humidifier performance. Int J Heat Mass Transf 2025;242:126827. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.126827>.
- [5] Dai W, Wang H, Yuan XZ, Martin JJ, Yang D, Qiao J, et al. A review on water balance in the membrane electrode assembly of proton exchange membrane fuel cells. Int J Hydrogen Energy 2009;34:9461–78. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.09.017>.
- [6] Chen B, Wang M, Tu Z, Gong X, Zhang H, Pan M, et al. Moisture dehumidification and its application to a 3 kW proton exchange membrane fuel cell stack. Int J Hydrogen Energy 2015;40:1137–44. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.076>.
- [7] Afshari E, Baharlou Houreh N. Performance analysis of a membrane humidifier containing porous metal foam as flow distributor in a PEM fuel cell system. Energy Convers Manag 2014;88:612–21. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.08.067>.
- [8] Cahalan T, Rehfeldt S, Bauer M, Becker M, Klein H. Analysis of membranes used in external membrane

-
- humidification of PEM fuel cells. *Int J Hydrogen Energy* 2017;42:15370–84. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.215>.
- [9] Lu C, Li Y, Liu Z, Zhou H, Zheng H, Chen B. Influence mechanisms of flow channel geometry on water transfer and pressure loss in planar membrane humidifiers for PEM fuel cells. *Int J Hydrogen Energy* 2022;47:38757–73. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.049>.
- [10] Baharlou Hourah N, Ghaedamini M, Shokouhmand H, Afshari E, Ahmaditaba AH. Experimental study on performance of membrane humidifiers with different configurations and operating conditions for PEM fuel cells. *Int J Hydrogen Energy* 2020;45:4841–59. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.017>.
- [11] Rokhman F, Yohana E, Tauviqirrahman M, Faried MI, Yulianto ME, Choi HU, et al. Performance Enhancement of Falling Film Dehumidifier by Variation Number and Width Ratio Rectangular Cylinder Based on CFD Simulation. *Int J Heat Mass Transf* 2024;221:125002. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125002>.