

Analisis CFD Dehumidifier Packed Bed Cross-Flow LiCl: Pengaruh Laju Desikan dan Kecepatan Udara

Noviana Dwi Puspitasari^{a,*}, Eflita Yohana^a, Muchammad^a, Apriani Simarmata^a, Ahmad Zukhruf Muttaqin^b

^aDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah, 50275

^bJurusan Rekayasa Perancangan Mekanik, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah, 50275

*E-mail: novianadwi2311@gmail.com

Abstract

This study analyzes the effect of variations in inlet air velocity (v_{udara}) and the mass flow rate of liquid desiccant lithium chloride (LiCl) (\dot{m}_L) on the performance of a cross-flow packed bed dehumidifier using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation. An increase in air velocity (v_{air}) generally increases the overall mass transfer coefficient (K_G) and the mass transfer rate (N) due to enhanced turbulence in the gas stream. Optimal performance was achieved at high velocities, but at the highest v_{udara} point (0.88 m/s), K_G and N decreased due to overly short contact time. Conversely, increasing the desiccant mass flow rate (\dot{m}_L) from 0.001 kg/s to 0.002 kg/s led to a decrease in both K_G and N . This decline is attributed to the increased thickness of the LiCl liquid film on the structured packing, which predominantly increases the diffusion resistance on the liquid side. The main conclusion is that $\dot{m}_L = 0.001$ kg/s provided the most optimal mass transfer performance, balancing sufficient contact area with minimized diffusion resistance.

Keyword : Dehumidifier Packed Bed, Liquid Desiccant LiCl, Computational Fluid Dynamic (CFD)

Abstrak

Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi kecepatan udara masuk (v_{udara}) dan laju massa aliran liquid desiccant lithium chloride (LiCl) (\dot{m}_L) terhadap kinerja packed bed dehumidifier konfigurasi cross-flow menggunakan simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD). Peningkatan kecepatan udara (v_{udara}) secara umum meningkatkan koefisien perpindahan massa keseluruhan (K_G) dan laju perpindahan massa (N) karena peningkatan turbulensi pada sisi gas. Kinerja optimal tercapai pada kecepatan tinggi, namun pada v_{udara} tertinggi (0.88 m/s), terjadi penurunan K_G dan N akibat waktu kontak yang terlalu singkat. Sebaliknya, peningkatan laju massa aliran desikan (\dot{m}_L) dari 0.001 kg/s hingga 0.002 kg/s justru menyebabkan penurunan K_G dan N . Penurunan ini disebabkan oleh peningkatan ketebalan film cairan LiCl pada *structured packing*, yang meningkatkan resistensi difusi dominan di sisi cair. Kesimpulan utamanya adalah $\dot{m}_L = 0.001$ kg/s memberikan kinerja transfer massa yang paling optimal, menyeimbangkan antara luas kontak dan minimasi resistensi difusi.

Kata kunci : Dehumidifier Packed Bed, Liquid Desiccant LiCl, Computational Fluid Dynamic (CFD)

1. Pendahuluan

Pengendalian kelembapan udara menjadi aspek penting dalam berbagai aplikasi *Heating, Ventilation, and Air Conditioning* (HVAC), proses industri, hingga pengkondisian udara pada lingkungan dengan kebutuhan kualitas udara yang bagus sesuai standart. Dalam dua dekade terakhir, sistem *Liquid Desiccant Dehumidification* (LDD) berkembang sebagai alternatif hemat energi yang mampu menghindari penggunaan refrigerasi konvensional serta memiliki kinerja yang tinggi dalam menurunkan kelembapan udara. Teknologi LDD memiliki potensi signifikan untuk meningkatkan efisiensi energi pada sistem pengkondisian udara modern [1][2].

Keunggulan utama sistem LDD terletak pada kemampuannya memanfaatkan energi panas tingkat rendah (*low-grade heat*), misalnya panas buangan industri atau energi terbarukan, untuk proses regenerasi desikan. Hal ini memberikan peluang besar untuk pengurangan konsumsi energi dan dampak lingkungan secara keseluruhan [1][2]. Di sisi lain, pemilihan jenis desikan cair juga menjadi faktor kunci dalam menentukan efektivitas proses penyerapan uap air. *Lithium chloride* (LiCl) menjadi salah satu desikan yang paling banyak diteliti karena memiliki tekanan uap kesetimbangan sangat rendah, kapasitas absorpsi tinggi, serta kestabilan kimia yang baik [3].

Untuk meningkatkan area kontak antara udara dan desikan, sistem LDD biasanya menggunakan tipe *packed bed*. Jenis *structured packing* yang memiliki luas permukaan spesifik tinggi serta distribusi aliran yang lebih seragam

terbukti mampu meningkatkan perpindahan massa dan panas [4]. Dalam konfigurasi *cross-flow*, aliran udara tegak lurus terhadap aliran desikan memberikan pola kontak yang berbeda dibanding *counter-current*, dan sejumlah penelitian melaporkan bahwa konfigurasi ini mempengaruhi ketebalan film cair, *wetting efficiency*, serta gradien konsentrasi yang mendorong perpindahan massa [5].

Meskipun penelitian eksperimental pada *packed bed structured packing* telah dilakukan, karakterisasi fenomena lokal seperti distribusi cairan, ketebalan film, dan area antarmuka tetap menghadapi kendala besar karena keterbatasan pengukuran langsung serta biaya instalasi eksperimen. Oleh karena itu, pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menjadi metode yang semakin banyak digunakan untuk memprediksi kinerja kolom *packed bed*. Studi terbaru menunjukkan bahwa CFD dapat menggambarkan aliran film, distribusi cairan, dan interaksi antarfase secara detail, terutama bila dikombinasikan dengan *User-Defined Function* (UDF) untuk memodelkan properti fisik desikan yang bergantung pada konsentrasi dan temperatur serta persamaan perpindahan massa yang terjadi [6].

Namun demikian, kajian terbaru menunjukkan bahwa penelitian yang mengombinasikan CFD, *structured packing*, larutan LiCl, dan variasi laju massa aliran desikan (\dot{m}_L) secara sistematis masih terbatas. Mayoritas literatur berfokus pada desain *packing*, pemilihan jenis desikan, atau performa sistem secara makro tanpa melakukan eksplorasi mendalam terhadap sensitivitas parameter operasi, khususnya laju aliran cairan dan kecepatan udara yang masuk ke dalam *packed bed* [1][7]. Padahal, laju massa aliran desikan merupakan parameter yang secara langsung memengaruhi ketebalan film, *interface renewal rate*, koefisien perpindahan massa total (K_G), serta laju perpindahan massa (N).

Selain itu, penelitian eksperimental oleh Li Zhang menyediakan data fundamental mengenai perpindahan massa pada *dehumidifier structured packing* berbasis desikan cair, yang dapat dijadikan dasar validasi numerik. Data ini sangat relevan sebagai acuan untuk memverifikasi model CFD, khususnya dalam konteks analisis fenomena adiabatik pada sistem *packed bed* [8].

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi laju massa aliran liquid desikan LiCl dan kecepatan udara masuk terhadap performa *packed bed dehumidifier* dalam konfigurasi *cross-flow*, melalui pendekatan CFD yang dilengkapi UDF untuk properti desikan. Kajian ini diharapkan dapat memberikan gambaran kuantitatif mengenai hubungan antara laju massa aliran *liquid* desikan LiCl dan kecepatan udara masuk, K_G , serta laju perpindahan massa (N), sehingga dapat menjadi dasar perancangan dan optimasi sistem LDD modern.

2. Deskripsi Analisis dan Metode Penelitian

2.1 Deskripsi Analisis

Pada penelitian ini akan disimulasikan *dehumidifier* tipe *packed bed* dengan *aliran cross flow* menggunakan software ANSYS Fluent untuk menganalisis beberapa parameter yang mempengaruhi seperti laju aliran desikan dan kecepatan udara lembab yang masuk ke dalam *bed*.

2.1.1 Packed Bed Dehumidifier

Dehumidifikasi merupakan salah satu metode dalam pengkondisian udara yang bertujuan untuk mengatur tingkat kelembaban. Proses ini dilakukan dengan mengurangi kandungan uap air dalam udara [9]. Udara yang terlalu lembab dapat memperlambat proses pengeringan dan mendorong pertumbuhan mikroorganisme berbahaya yang dapat mengganggu kualitas dan keamanan produk.

Dehumidifier adalah perangkat yang dirancang untuk mengurangi atau menghilangkan kelembaban dari udara. Alat ini menjadi bagian penting dalam sistem pengatur kondisi udara. Penurunan kadar uap air di udara dalam *dehumidifier* dapat dilakukan melalui sistem pendinginan atau menggunakan bahan pengering cair (*liquid desiccant*).

Secara umum, ada empat jenis *dehumidifier*, yaitu: *spray tower*, *packed bed*, *falling film*, dan *indirect contact* [10]. Sistem operasi *packed bed* telah menarik perhatian luas dalam upaya menurunkan kadar uap air dalam aliran udara lembap karena keunggulan desain dan performanya. Salah satu keunggulan utama dari sistem ini adalah desainnya yang ringkas dan efisien, memungkinkan integrasi yang mudah dalam berbagai aplikasi industri tanpa memerlukan ruang yang luas. Desain kompak ini juga mendukung efisiensi tinggi dalam proses *dehumidifikasi* [11]. Selain itu, sistem *packed bed* menawarkan luas area kontak yang besar antara udara lembap dan larutan desikan. Hal ini meningkatkan efektivitas transfer massa dan panas, yang penting untuk proses *dehumidifikasi* yang efisien. Waktu kontak yang relatif lama antara fluida dalam sistem ini juga berkontribusi pada peningkatan efisiensi proses, memungkinkan lebih banyak uap air diserap oleh desikan.

2.1.2 Liquid Desiccant

Liquid desiccant menjadi bagian yang sangat penting dalam sistem *dehumidifikasi* udara. *Liquid desiccant* pada proses *dehumidifikasi* dapat menyerap kelembaban udara karena memiliki sifat hidroskopis sehingga kelembaban udara dapat dijaga sesuai tingkat yang ditentukan.

Liquid desiccant lebih sering digunakan dibanding *solid desiccant* karena memiliki beberapa keunggulan seperti kemampuan penyerapan kelembaban yang tinggi, udara tidak mengalami *pressure drop* yang besar, temperatur regenerasi yang rendah, dan fleksibilitas dalam pengoperasian[9][12].

Di antara berbagai bahan tersebut, larutan berair *lithium chloride* (LiCl) sering dianggap sebagai pilihan paling unggul karena sifat fisiknya yang mendukung, seperti tidak mudah menguap pada kondisi lingkungan normal dan memiliki viskositas rendah, yang membantu mengurangi kebutuhan energi untuk proses sirkulasi meskipun larutan ini termasuk korosif dan mahal [13].

2.1.3 Persamaan Pembangun dan *Mass Transfer*

Pada penelitian ini fluida diatur sebagai kondisi transien, dengan *properties* dari masing-masing fluida yaitu udara dan LiCl diatur menggunakan UDF. Kondisi aliran yang bermodelakan *cross flow* dengan ditambah didalamnya terdapat *structured packed* akan membuat sirkusi aliran tidak seragam sehingga didalamnya terbentuk daerah turbulen. Persamaan pembangun yang digunakan pada pemodelan CFD pada penelitian ini adalah persamaan kontinuitas, persamaan momentum, dan persamaan energi.

1. Persamaan Kontinuitas

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

Dimana ρ adalah densitas dan \vec{u} adalah vector kecepatan.

2. Persamaan Momentum

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu (\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T)) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

Dimana μ adalah viskositas fluida, \vec{g} adalah akselerasi gravitasi, \vec{F} adalah *source term*.

3. Persamaan Energi

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}(\rho E + P)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum h_k J_k) + S_E \quad (3)$$

Dimana E adalah rata-rata energi, P adalah tekanan, T adalah temperatur absolut, S_E adalah *volumetrik heat source*.

Persamaan transfer massa dari proses penyerapan uap air yang ada didalam udara lembab yang akan diserap oleh larutan LiCl diatur menggunakan UDF, kemudian didalamnya juga diatur persamaan untuk menghitung berapa nilai koefisien transfer massa keseluruhan (K_G) dan laju perpindahan massa (N) yang terjadi.

4. Persamaan koefisien transfer massa keseluruhan (K_G) untuk *structured packing*

$$K_G \left(\frac{d_e}{D_G \rho_G} \right) = Sh = n_1 Re_G^{n_2} Sc_G^{n_3} Re_L^{n_4} Sc_L^{n_5} \quad (4)$$

5. Persamaan laju perpindahan massa (N) untuk *structured packing*

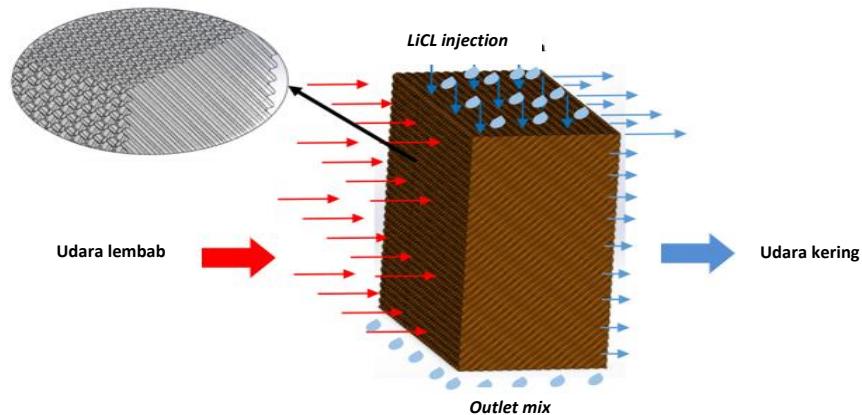
$$N = K_G \cdot A |X_G - X_{G,e}| \quad (5)$$

Dimana X_G adalah rata-rata *ratio humidity* dari fase gas, sedangkan $X_{G,e}$ adalah *equilibrium humidity ratio* dari larutan desikan.

2.2 Metode Penelitian

2.2.1 Kondisi Batas

Penelitian ini menggunakan desain geometri *packed bed dehumidifier* dengan isi nya adalah *packing* tipe *structured*. Model aliran yang digunakan adalah *cross flow* sehingga sisi masuk udara lembab berada di posisi kiri arah horizontal menuju sisi keluar yang berada di kanan. Sedangkan sisi masuk larutan desikan LiCl berada diatas *bed* arah vertikal ke bawah menuju sisi *outlet mix* (bisa larutan LiCl dan udara) seperti yang terlihat pada Gambar 1. Ukuran *bed* adalah 30cm x 27cm x 7cm dengan isian *structured packing* ukuran 25cm x 25cm x 5 cm. Adapun parameter simulasi yang akan dilakukan disajikan pada Tabel 1.



Gambar 1. Skema *packed bed cross flow dehumidifier* isian *structured packing*

Tabel 1. Parameter yang digunakan dalam simulasi

Tipe	Laju massa aliran LiCl (kg/s)	Konsentrasi LiCl (%)	Temperature LiCl (K)	Kecepatan udara lembab (m/s)	Mass fraction H2O	Temperature udara lembab (K)
Structured packing	0.001, 0.001667, 0.002	34	293.15	0.33, 0.48, 0.65, 0.81, 0.88	0.0148	308.15

2.2.2 Pengaturan Simulasi

Terdapat dua fluida yang disimulasikan atau sering disebut kondisi *multiphase* dalam simulasi sehingga untuk memodelkan ini menggunakan model *Volume of Fluid* (VOF). Proses dehumidifikasi berlangsung dengan adanya transfer uap air yang ada di udara lembab diserap oleh aliran larutan desikan LiCl yang melewatinya. Sehingga pengaturan presentase seperti massa fraksi dari udara kering dan lembab termasuk juga konsentrasi dari larutan LiCl diatur dengan mengaktifkan model *species transport* dalam simulasi.

Skema diskritisasi *pressure-velocity* menggunakan SIMPLE karena mudah mencapai konvergen, sedangkan diskritisasi tekanan menggunakan skema PRESTO!. Simulasi dilakukan dalam kondisi transient selama 9 detik dengan *time step size* 0.15 detik. Pemilihan ukuran *time step* yang terlalu besar maka hasil simulasi akan menyimpang dan membuat divergen tetapi jika terlalu kecil maka akan membuat waktu perhitungan semakin lama. Dalam pemilihan ukuran *time step* setidaknya satu order lebih kecil dibanding konstanta terkecil waktu yang dimodelkan untuk dapat memodelkan fenomena transien dengan baik.

2.2.3 Validasi Jurnal

Dalam pemodelan simulasi ini dibutuhkan validasi paper sebagai acuan bahwa pengaturan simulasi dan hasil analisis mendekati kondisi riil (benar dan sesuai). Pengujian seacra eksperimental yang dilakukan oleh Li Zhang (2010) [8] dijadikan acuan dalam validasi dengan kondisi pemodelan *dehumidifier* tipe *packed bed* dengan model aliran *cross flow* menggunakan larutan LiCl sebagai desikan.

Berdasarkan pemodelan kasus validasi, didapat hasil perbandingan nilai K_G dengan dua titik validasi variasi kecepatan udara lembab yang masuk. Perbandingan ini dapat ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil validasi

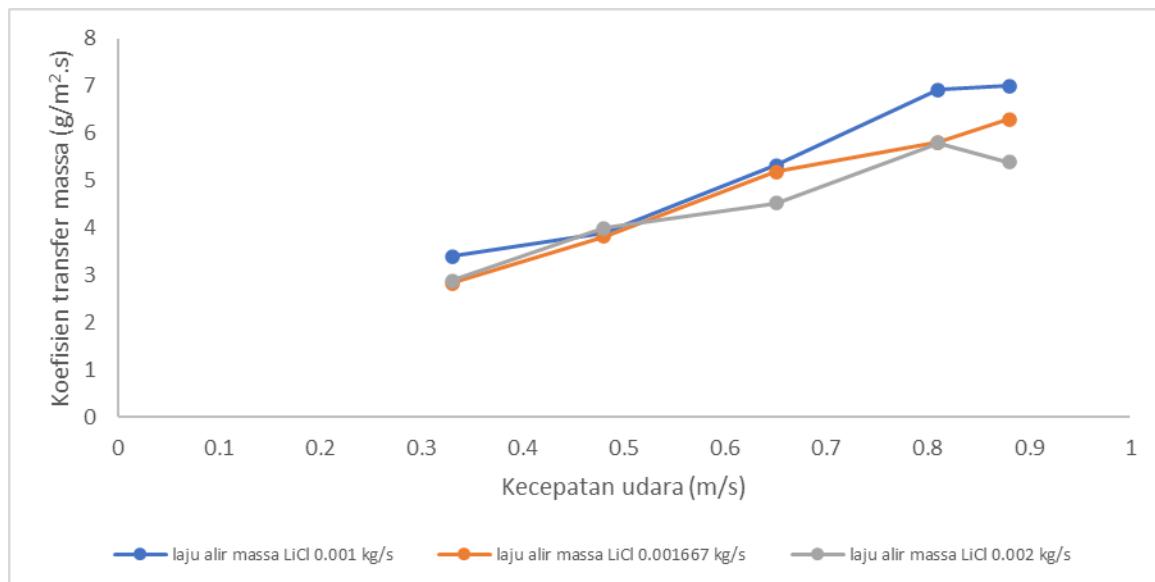
Kondisi variasi validasi	Koefisien transfer massa (K_G)		
	Hasil simulasi (g/m ² .s)	Hasil studi eksperimen (g/m ² .s)	Error (%)
Kondisi v_{udara} 0,33 m/s	2,50	2,60	3,84
Kondisi v_{udara} 0,48 m/s	3,42	3,63	5,67

3. Hasil dan Pembahasan

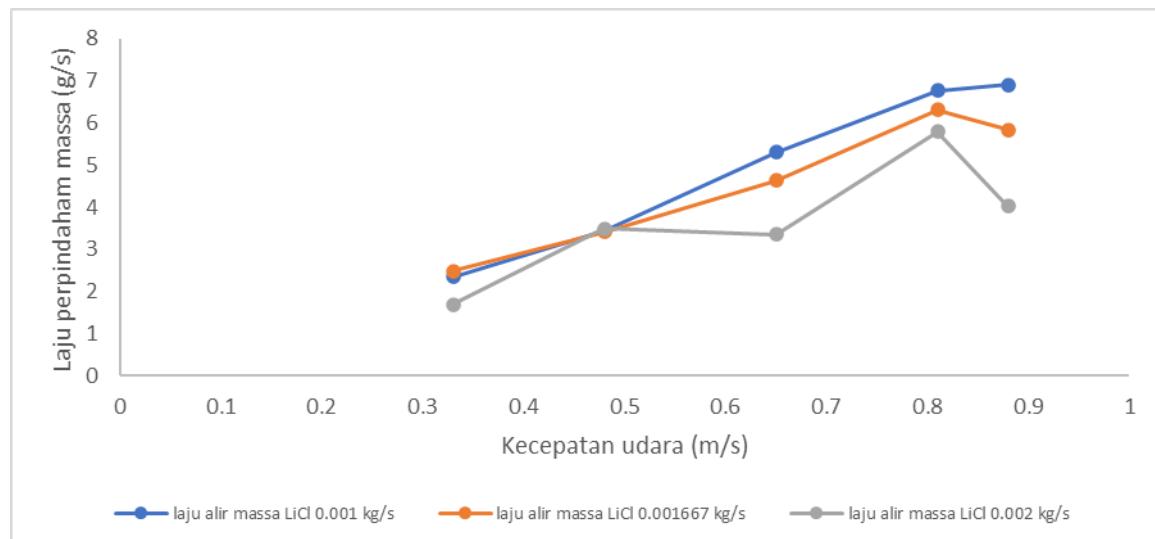
3.1 Pengaruh Variasi Kecepatan Udara Masuk

Analisis ini mengevaluasi dampak variasi kecepatan udara lembab yang masuk (v_{udara}) terhadap performa *dehumidifier packed bed* konfigurasi *cross-flow* melalui koefisien transfer massa keseluruhan (K_G) dan laju perpindahan massa (N). Gambar 2 dan Gambar 3 menunjukkan bahwa secara umum, nilai K_G dan N cenderung meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan udara masuk. Untuk $\dot{m}_L = 0.001 \text{ kg/s}$, K_G meningkat dari sekitar 3.4 g/m².s pada $v_{udara} = 0.33 \text{ m/s}$ menjadi puncak 7.0 g/m².s pada $v_{udara} = 0.81 \text{ m/s}$. Peningkatan K_G ini sejalan dengan prinsip perpindahan massa di mana peningkatan v_{udara} akan meningkatkan turbulensi di sekitar *packing*, sehingga mengurangi ketebalan lapisan batas pada sisi gas. Lapisan batas yang lebih tipis meminimalkan resistensi difusi, menghasilkan nilai K_G yang lebih tinggi. Peningkatan N juga didorong oleh laju alir massa udara total yang lebih besar, membawa lebih banyak uap air melewati desikan per satuan waktu.

Namun, tren ini tidak linear secara keseluruhan. Terlihat fenomena di mana K_G dan N mulai menurun atau stabil pada kecepatan udara tertinggi, yaitu $v_{udara} = 0.88 \text{ m/s}$, terutama untuk laju massa aliran desikan (\dot{m}_L) yang lebih tinggi (0.001667 kg/s dan 0.002 kg/s). Sebagai contoh, pada $\dot{m}_L = 0.002 \text{ kg/s}$, nilai N mengalami penurunan dari 5.8 g/s (di 0.81 m/s) menjadi 4.0 g/s (di 0.88 m/s). Penurunan kinerja pada kecepatan udara yang sangat tinggi mengindikasikan bahwa waktu kontak antara udara lembab dan film LiCl menjadi terlalu singkat untuk mencapai penyerapan uap air yang optimal. Selain itu, kecepatan udara yang sangat tinggi dapat memicu pola aliran non-ideal atau *channeling* di dalam *structured packing*, yang secara efektif mengurangi luas permukaan kontak antar-fase, meskipun K_G pada titik lokal mungkin masih tinggi. Pendekatan CFD yang digunakan dalam penelitian ini sangat penting untuk menggambarkan fenomena transien ini secara detail.



Gambar 2. Grafik perbandingan kecepatan udara dengan hasil nilai koefisien transfer massa

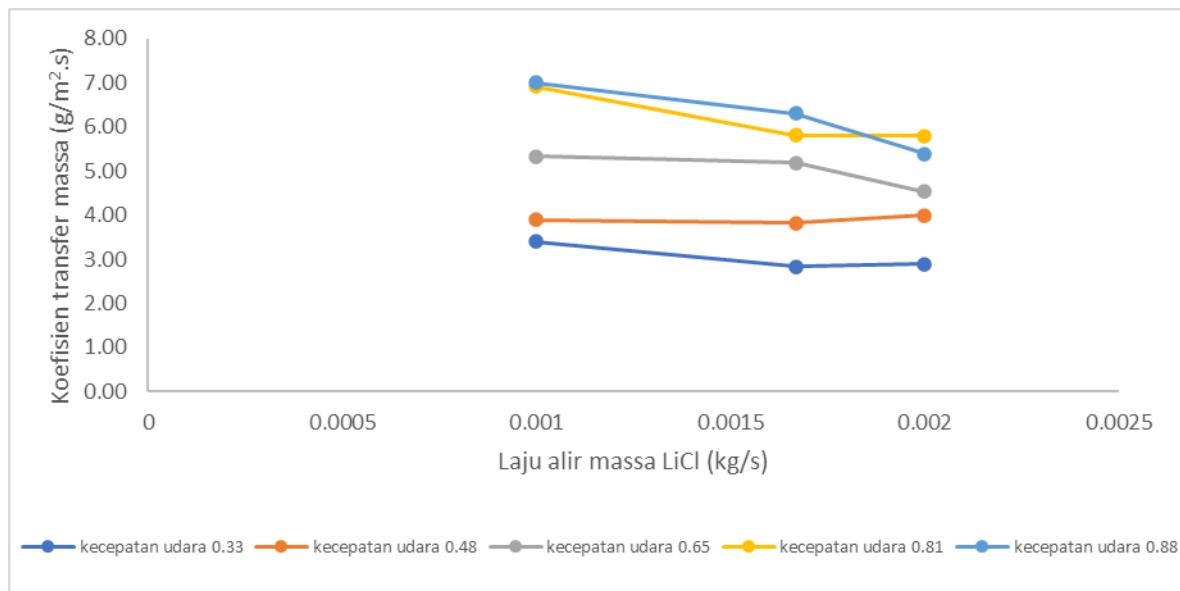


Gambar 3. Grafik perbandingan kecepatan udara dengan hasil nilai laju perpindahan massa

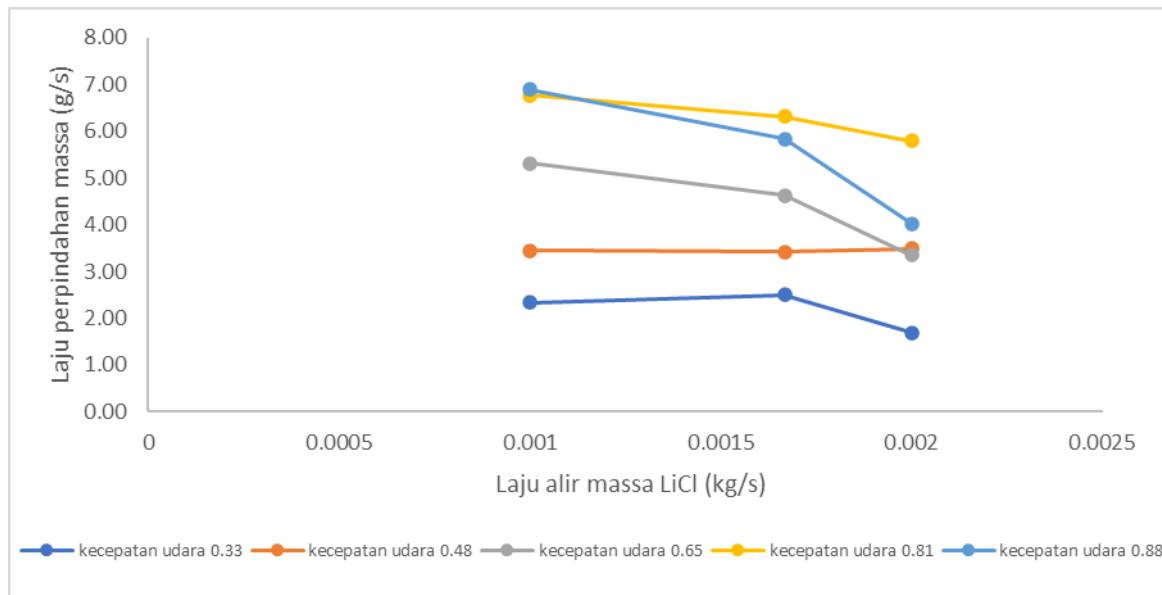
3.2 Pengaruh variasi *mass flowrate* LiCl

Analisis pengaruh variasi laju massa aliran *liquid desiccant* LiCl (\dot{m}_L) terhadap kinerja sistem didukung oleh Gambar 4 dan Gambar 5, yang memplot K_G dan N sebagai fungsi dari \dot{m}_L pada berbagai kecepatan udara. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada sebagian besar kondisi kecepatan udara, peningkatan \dot{m}_L menyebabkan penurunan nilai K_G dan N . Sebagai contoh, pada kecepatan udara (v_{udara} = 0.81 m/s), K_G tertinggi dicapai pada \dot{m}_L = 0.001 kg/s (6.9 $\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{s}$), dan menurun menjadi 5.8 $\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ pada \dot{m}_L = 0.002 kg/s. Trend serupa terlihat pada laju perpindahan massa (N).

Penurunan K_G seiring peningkatan \dot{m}_L mengindikasikan bahwa resistensi difusi di sisi cair menjadi faktor pembatas utama, mengalahkan manfaat peningkatan *wetting efficiency* yang seharusnya dibawa oleh laju alir yang lebih tinggi. Peningkatan \dot{m}_L secara langsung menyebabkan peningkatan ketebalan film cairan LiCl di permukaan *structured packing*. Meskipun larutan LiCl memiliki kapasitas absorpsi tinggi, film yang terlalu tebal akan memperpanjang jalur difusi uap air di dalam desikan cair, sehingga meningkatkan resistensi perpindahan massa total dan menurunkan K_G . Karena K_G merupakan faktor yang secara langsung memengaruhi laju perpindahan massa yang terjadi, penurunan K_G berujung pada penurunan N . Penemuan ini menekankan pentingnya optimasi laju massa aliran desikan untuk mencapai keseimbangan antara penyediaan luas kontak yang cukup dan minimasi resistensi difusi internal.



Gambar 4. Grafik perbandingan laju aliran massa LiCl dengan nilai koefisien transfer massa



Gambar 5. Grafik perbandingan laju aliran massa LiCl dengan nilai laju perpindahan massa

4. Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi kecepatan udara masuk (v_{udara}) dan laju massa aliran *liquid desiccant lithium chloride* (LiCl) (\dot{m}_L) terhadap kinerja *packed bed dehumidifier* konfigurasi *cross-flow* menggunakan simulasi CFD. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan udara (v_{udara}) secara umum meningkatkan koefisien perpindahan massa keseluruhan (K_G) dan laju perpindahan massa (N), karena peningkatan turbulensi pada aliran gas yang mengurangi resistensi lapisan batas dan meningkatkan laju alir massa udara total. Kinerja optimal sistem tercapai pada kecepatan udara tinggi, namun di titik v_{udara} tertinggi (0.88 m/s), terutama untuk \dot{m}_L yang lebih tinggi, terjadi penurunan K_G dan N yang diindikasikan oleh waktu kontak yang terlalu singkat dan potensi pola aliran non-ideal. Sebaliknya, variasi laju massa aliran desikan menunjukkan bahwa peningkatan \dot{m}_L (dari 0.001 kg/s hingga 0.002 kg/s) justru menyebabkan penurunan K_G dan N pada sebagian besar kondisi operasi. Hal ini disebabkan oleh peningkatan ketebalan film cairan LiCl yang secara dominan meningkatkan resistensi difusi di sisi cair, mengalahkan manfaat peningkatan *wetting efficiency*. Kesimpulan utamanya adalah bahwa $\dot{m}_L = 0.001 \text{ kg/s}$ memberikan kinerja transfer massa yang paling optimal, menyeimbangkan antara luas kontak dan minimasi resistensi difusi.

Daftar Pustaka

- [1] X. Chen, S. Riffat, B. Hongyu, X. Zheng, and D. Reay, "Recent Progress in Liquid Desiccant Dehumidification and Air-conditioning: A Review," *Energy Built Environ.*, 2019, doi: 10.1016/j.enbenv.2019.09.001.
- [2] J. Sonowal, B. K. Naik, D. V. N. Lakshmi, P. Muthukumar, and R. Anandalakshmi, "Evolution of solar driven desiccant systems for energy-efficient air conditioning : A review," *Sol. Compass*, vol. 14, no. March, p. 100115, 2025, doi: 10.1016/j.solcom.2025.100115.
- [3] F. G. Fahad *et al.*, "Advancements in Liquid Desiccant Technologies : A Comprehensive Review of Materials , Systems , and Applications," 2023.
- [4] S. Hu, A. Shiue, Y. Chiu, A. Wang, and J. Chen, "Simplified Heat and Mass Transfer Model for Cross-Flow and Countercurrent Flow Packed Bed Tower Dehumidifiers with a Liquid Desiccant System," no. LiCl, 2016, doi: 10.3390/su8121264.
- [5] A. Giampieri, Z. Ma, J. Ling-chin, H. Bao, A. J. Smallbone, and A. P. Roskilly, "Liquid desiccant dehumidification and regeneration process : Advancing correlations for moisture and enthalpy effectiveness," *Appl. Energy*, vol. 314, no. March, p. 118962, 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118962.
- [6] R. K. Singh *et al.*, "Hydrodynamics of countercurrent flow in an additive manufactured column with triply periodic minimal surfaces for carbon dioxide capture".
- [7] Y. Fu, J. Bao, R. Singh, C. Wang, and Z. Xu, "Investigation of countercurrent flow profile and liquid holdup in random packed column with local CFD data," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 221, p. 115693, 2020, doi: 10.1016/j.ces.2020.115693.
- [8] L. Zhang, E. Hihara, F. Matsuoka, and C. Dang, "Experimental analysis of mass transfer in adiabatic structured packing dehumidifier/regenerator with liquid desiccant," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 53, no. 13–14, pp. 2856–2863, 2010, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.02.012.
- [9] X. Chen, S. Riffat, H. Bai, X. Zheng, and D. Reay, "Recent progress in liquid desiccant dehumidification and air-conditioning: A review," *Energy Built Environ.*, vol. 1, no. 1, pp. 106–130, 2020, doi: 10.1016/j.enbenv.2019.09.001.
- [10] T. Wen, L. Lu, and Y. Luo, "Review on the fundamentals and investigations of falling film dehumidification/absorption refrigeration based on CFD technology," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 171, p. 121042, 2021, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121042.
- [11] M. J. (Editor) Zapka, "Asia Pacific Research Initiative for Sustainable Energy Systems - Final Technical Report," vol. 2012, no. August, p. September, 2017.
- [12] P. Vivekh, M. Kumja, D. T. Bui, and K. J. Chua, "Recent developments in solid desiccant coated heat exchangers – A review," *Appl. Energy*, vol. 229, no. August, pp. 778–803, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.08.041.
- [13] M. Bhowmik, R. Anandalakshmi, and P. Muthukumar, "Numerical investigation of performance trade-off characteristics of a packed bed dehumidifier using aqueous blends of lithium chloride and calcium chloride," *Heat Mass Transf. und Stoffuebertragung*, vol. 56, no. 11, pp. 3093–3109, 2020, doi: 10.1007/s00231-020-02893-y.