

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas landasan teori yang mendukung penelitian rancang bangun *test bed dehumidifier* berbasis *desiccant* dengan *heater* listrik sebagai sumber energi regenerasi. Pembahasan meliputi konsep dasar sistem *dehumidifier* berbasis *rotating desiccant wheel*, prinsip kerja adsorpsi dan regenerasi, faktor-faktor yang memengaruhi kinerja sistem, karakteristik material *desiccant*, serta dasar perancangan *test bed* dan perhitungan *sizing* sebagai acuan dalam penelitian ini.

2.1 Teknologi Pengendalian Kelembapan (*Dehumidifier*)

Dalam sistem industri modern, pengendalian kelembapan udara menjadi salah satu faktor yang sangat penting karena berbagai proses produksi mensyaratkan kondisi udara dengan temperatur dan kelembapan yang terjaga secara konsisten. Tingkat kelembapan tidak hanya memengaruhi kenyamanan serta kesehatan manusia, tetapi juga berpengaruh terhadap karakteristik material dan kualitas produk yang diproses di dalam ruang tertutup (Kamsah *et al.*, 2016; Pamungkas dan Sasongko, 2023). Apabila kelembapan udara tidak dikendalikan dengan baik, berbagai permasalahan dapat muncul, seperti pertumbuhan mikroorganisme, penurunan mutu produk, khususnya pada industri pangan dan farmasi, serta percepatan kerusakan material maupun peralatan produksi. Oleh sebab itu, pengaturan kelembapan merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari sistem pengendalian lingkungan industri.

Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, berbagai industri menerapkan sistem

dehumidifier yang dirancang mampu beroperasi secara kontinu, memiliki kapasitas aliran udara yang besar, tingkat keandalan yang tinggi, serta dapat diintegrasikan dengan sistem kontrol proses. Penentuan jenis *dehumidifier* umumnya mempertimbangkan beberapa parameter operasi, meliputi target kelembapan, temperatur kerja, laju aliran udara, dan kebutuhan konsumsi energi. Di antara berbagai teknologi yang tersedia, sistem dehumidifikasi berbasis *desiccant* diketahui mampu mengurangi beban laten secara efektif dan memungkinkan proses regenerasi berlangsung pada temperatur yang relatif rendah dengan memanfaatkan sumber energi bertingkat rendah (*low-grade energy*) (Jani, 2020). Dengan demikian, pemahaman mengenai karakteristik setiap teknologi *dehumidifier* menjadi landasan penting dalam proses perancangan maupun evaluasi sistem pengendalian udara pada aplikasi industri.

2.1.1 Pengertian *dehumidifier*

Dehumidifier merupakan perangkat yang dirancang untuk mengurangi kandungan uap air di dalam udara melalui proses dehumidifikasi sehingga kondisi kelembapan dapat dipertahankan pada tingkat yang diinginkan. Pengendalian kelembapan tersebut bertujuan untuk meminimalkan dampak negatif terhadap kesehatan manusia, menjaga kualitas produk, serta mencegah penurunan kondisi material akibat kelembapan yang berlebihan (Pamungkas dan Sasongko, 2023). Dalam aplikasi industri, sistem ini memiliki peran penting dalam mempertahankan stabilitas proses produksi, mengurangi potensi korosi pada peralatan, serta memastikan mutu produk tetap sesuai dengan standar yang ditetapkan. Konfigurasi umum *dehumidifier* untuk kebutuhan industri ditunjukkan pada Gambar 2. 1. Gambar tersebut memperlihatkan bahwa sistem terdiri atas unit pengolahan udara yang terintegrasi dengan sistem kontrol

beserta komponen pendukung lainnya sehingga mampu bekerja sebagai satu kesatuan yang saling terhubung. Dari sisi prinsip kerja, proses dehumidifikasi berlangsung melalui mekanisme perpindahan kalor dan perpindahan massa. Pada sistem berbasis refrigerasi, pengurangan kelembapan terjadi melalui proses kondensasi uap air, sedangkan pada sistem berbasis *desiccant*, uap air dihilangkan melalui mekanisme adsorpsi. Menurut Jani (2020), teknologi *desiccant* mampu menurunkan beban laten dan beban sensibel secara signifikan, meskipun memberikan peningkatan terhadap hambatan perpindahan massa. Perbedaan mekanisme kerja tersebut menyebabkan karakteristik performa serta kebutuhan energi setiap sistem menjadi berbeda. Oleh karena itu, pemilihan jenis *dehumidifier* perlu mempertimbangkan kondisi operasi dan kebutuhan aplikasi. Pada implementasinya di lingkungan industri, *industrial dehumidifier* umumnya diintegrasikan dengan sistem ventilasi dan pengondisian udara yang dilengkapi kontrol otomatis untuk mengatur temperatur, laju aliran udara, serta proses regenerasi atau pendinginan secara akurat sehingga operasi sistem dapat berlangsung secara efisien dan berkelanjutan.



Gambar 2. 1 *Industrial dehumidifier*
(Sumber: Kontraktor HVAC Team 2018)

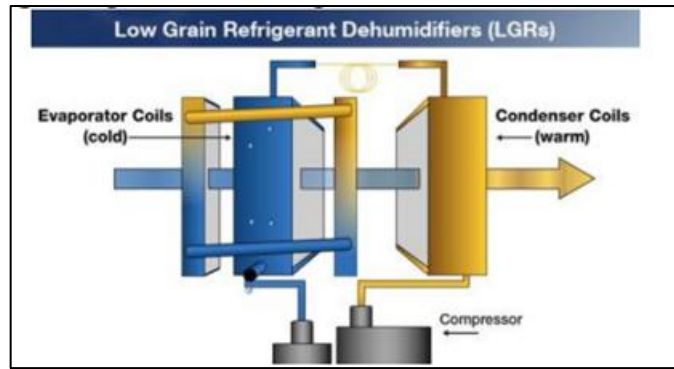
2.1.2 Jenis - jenis *dehumidifier* skala industri

Dehumidifier skala industri dapat diklasifikasikan berdasarkan prinsip kerja yang digunakan dalam mengurangi kandungan uap air di udara. Klasifikasi ini menentukan mekanisme pemisahan uap air, karakteristik performa sistem, serta kesesuaian aplikasi pada berbagai kondisi operasi industri. Secara umum, *dehumidifier* industri terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu *dehumidifier* refrigerasi dan *dehumidifier desiccant*.

1. *Dehumidifier* Refrigerasi

Dehumidifier refrigerasi merupakan teknologi dehumidifikasi yang banyak diterapkan karena memiliki prinsip operasi yang sederhana serta mampu memberikan kinerja yang baik pada berbagai kebutuhan, mulai dari aplikasi rumah tangga hingga sektor komersial. Sistem ini umumnya digunakan pada daerah dengan temperatur udara relatif tinggi dan kondisi kelembapan udara yang juga tinggi, sehingga proses pengurangan uap air dapat berlangsung secara efektif (Kurniawan, Ruslani dan Anggriawan, 2017).

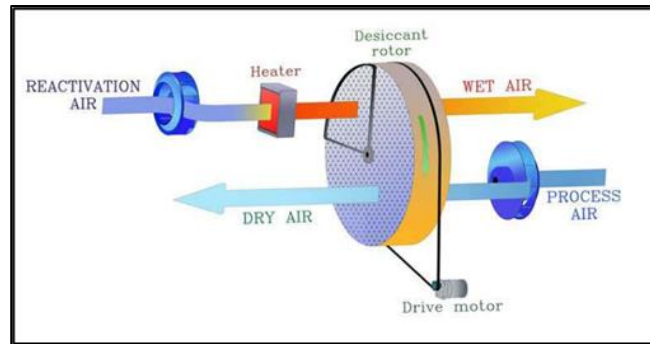
Prinsip kerja *dehumidifier* refrigerasi memanfaatkan siklus refrigerasi kompresi uap dengan komponen utama berupa evaporator dan kondensor. Skema proses yang ditunjukkan pada Gambar 2. 2 memperlihatkan bahwa udara lembap terlebih dahulu melewati evaporator sehingga temperaturnya turun hingga berada di bawah titik embun. Kondisi tersebut menyebabkan uap air yang terkandung di dalam udara mengalami kondensasi dan terpisah sebagai air. Selama proses berlangsung, refrigeran berfungsi sebagai media perpindahan panas yang mengalami rangkaian siklus kompresi, kondensasi, ekspansi, dan evaporasi secara berulang. Mekanisme tersebut memungkinkan proses dehumidifikasi berlangsung secara berkesinambungan dengan tingkat efisiensi yang baik (Kurniawan, Ruslani dan Anggriawan, 2017).



Gambar 2. 2 Proses *refrigerant dehumidifier*
(Sumber: Kurniawan, Ruslani dan Anggriawan, 2017)

2. *Dehumidifier Desiccant*

Dehumidifier desiccant bekerja dengan menyerap uap air menggunakan material *desiccant* yang menciptakan tekanan uap lebih rendah di permukaannya sehingga uap air berpindah dari udara ke material dan menurunkan kelembapan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. 3 melalui aliran *process air in* yang melewati *desiccant wheel* dan keluar sebagai *process air out*. Setelah jenuh, *desiccant* diregenerasi melalui pemanasan atau aliran udara kering agar kapasitas penyerapannya kembali optimal (Surbakti, Yunianto dan Muchammad, 2024). Berdasarkan sifat fisiknya, *desiccant* terdiri atas *desiccant* padat dan *desiccant* cair. Sementara itu, berdasarkan mekanisme penyerapan uap air, *desiccant* diklasifikasikan menjadi adsorben yang mengikat uap air pada permukaan material (bersifat higroskopis) serta absorben yang menyerap uap air melalui perubahan struktur kimia. Kedua mekanisme tersebut menghasilkan karakteristik perpindahan massa yang berbeda dari sistem refrigerasi konvensional (Surbakti, Yunianto, dan Muchammad, 2024).



Gambar 2. 3 Proses *desiccant dehumidifier*
(Sumber: Kamsah et al., 2016)

Sistem dehumidifikasi berbasis *desiccant* memiliki keunggulan pada kemampuannya bekerja efisien pada kelembapan sangat rendah, dengan efisiensi energi yang baik serta fleksibilitas aplikasi pada industri makanan, farmasi, dan laboratorium. Selain itu, sistem ini mampu memberikan pengendalian kelembapan yang lebih presisi sesuai kebutuhan proses operasional (Surbakti, Yunianto dan Muchammad, 2024).

2.2 Test Bed Dehumidifier

2.2.1 Pengembangan dan studi eksperimental test bed dehumidifier

Berbagai penelitian eksperimental menunjukkan bahwa kinerja sistem *dehumidifier* berbasis *desiccant* sangat dipengaruhi oleh temperatur regenerasi, laju aliran udara adsorpsi dan regenerasi, serta rasio aliran udara antar sisi. Suhu regenerasi merupakan parameter penting dalam sistem dehumidifikasi berbasis *desiccant* karena berpengaruh langsung terhadap proses desorpsi uap air dari material. Semakin tinggi suhu regenerasi, semakin besar energi yang tersedia untuk melepaskan uap air,

sehingga kapasitas adsorpsi pada siklus berikutnya dapat meningkat. Namun, peningkatan suhu yang terlalu tinggi dapat menurunkan efisiensi energi sistem. Beberapa penelitian melaporkan bahwa suhu regenerasi umumnya berada pada rentang 40 - 120°C tergantung jenis *desiccant* dan konfigurasi sistem. Yu et al. (2022) menunjukkan bahwa variasi suhu regenerasi pada kisaran 40 - 70°C sudah mampu meningkatkan performa sistem dehumidifikasi berbasis polimer secara signifikan.

Hasil penelitian Kushwaha dan Kumar (2025) serta Yang *et al.* (2025) menunjukkan bahwa karakteristik operasi *desiccant dehumidifier*, khususnya kecepatan putar rotor dan laju aliran udara, memberikan pengaruh yang nyata terhadap *Moisture Removal Capacity* (MRC) dan efisiensi proses adsorpsi. Menurut Yang *et al.* (2025), peningkatan temperatur regenerasi hingga sekitar 110°C dapat meningkatkan kapasitas dehumidifikasi secara signifikan apabila dioperasikan pada kecepatan putar yang optimum. Selain parameter tersebut, hasil studi numerik juga mengindikasikan bahwa kelembapan relatif udara masuk dan kecepatan aliran udara berperan dalam menentukan kapasitas adsorpsi aktual serta distribusi temperatur di dalam sistem. Temuan Saputra *et al.* (2020) memperkuat hasil tersebut dengan menunjukkan bahwa temperatur regenerasi yang dipertahankan tetap selama operasi mampu menjaga kestabilan performa sistem meskipun terjadi perubahan beban panas.

Di antara berbagai jenis material *desiccant*, *silica gel* masih menjadi pilihan yang paling banyak digunakan karena memiliki kestabilan termal yang baik serta kemampuan adsorpsi yang tinggi pada lingkungan dengan kelembapan udara tinggi. Penelitian Al Obaidi, Peterson, dan Hui (2022) menunjukkan bahwa *silica gel* mampu menyerap air hingga 48,4% setelah 45 menit proses adsorpsi, yang setara dengan sekitar 0,484 g air untuk setiap 98,9 g *silica gel* ($\approx 4,9$ g/kg). Sementara itu, kapasitas

adsorpsi teoritis maksimum material tersebut dilaporkan dapat mencapai sekitar 400 g/kg. Perbedaan yang cukup besar antara kapasitas aktual dan kapasitas teoritis mengindikasikan bahwa proses adsorpsi dipengaruhi oleh keterbatasan kinetika serta fenomena perpindahan panas selama operasi berlangsung. Temuan tersebut sejalan dengan hasil penelitian Hraiech *et al.* (2025), yang menjelaskan bahwa peningkatan temperatur operasi menyebabkan kapasitas adsorpsi *silica gel* menurun karena proses adsorpsi uap air bersifat eksotermik. Kinerja material ini juga didukung oleh karakteristik fisiknya, yaitu luas permukaan spesifik dan volume pori yang tinggi sebagaimana dibuktikan melalui pengujian *Brunauer Emmett Teller* (BET) oleh Yeboah dan Darkwa (2021). Selain itu, Hanif *et al.* (2023) melaporkan bahwa *silica gel* RD memiliki kapasitas adsorpsi kesetimbangan sekitar 0,38 kg/kg pada kondisi RH 60% dan temperatur 27°C. Namun, kapasitas yang dapat dimanfaatkan secara aktual tetap dipengaruhi oleh hambatan kinetika, difusi massa, serta efek termal selama proses adsorpsi berlangsung. Dengan efisiensi dehumidifikasi yang mencapai 85%, *silica gel* dinilai memiliki performa yang sangat baik untuk diterapkan pada sistem dehumidifikasi berbasis *solid desiccant*.

Selain pengembangan parameter operasi, peningkatan performa sistem dehumidifikasi juga dilakukan melalui modifikasi material *desiccant*. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa material komposit mampu memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan penggunaan material tunggal. Behede, Chakrabarti, dan Wankhede (2024) melaporkan bahwa komposit *silica gel*-CaCl₂ mampu meningkatkan *Moisture Removal Capacity* (MRC) serta *Dehumidification Coefficient of Performance* (DCOP). Hasil serupa juga diperoleh Rambhad *et al.* (2023), yang menunjukkan bahwa kombinasi *silica gel*-LiCl *molecular sieve* 5A menghasilkan laju

adsorpsi yang lebih tinggi dibandingkan material konvensional. Di sisi lain, Su *et al.* (2024) melaporkan bahwa *synthesized metal silicate* memberikan performa dehumidifikasi yang lebih baik ketika diterapkan pada sistem dengan konfigurasi regenerasi resirkulasi. Selain pengembangan material, Liu *et al.* (2024) menunjukkan bahwa penerapan *dual desiccant coated heat exchanger* mampu meningkatkan *Dehumidification Coefficient of Performance* (DCOP) hingga mencapai 0,41. Temuan-temuan tersebut mengindikasikan bahwa pemilihan material desiccant merupakan salah satu aspek penting yang perlu dipertimbangkan dalam proses perancangan sistem dehumidifikasi.

Selain material dan parameter operasi, konfigurasi sistem serta strategi regenerasi juga menentukan efisiensi energi dan stabilitas kinerja. Su *et al.* (2024) menunjukkan bahwa konfigurasi regenerasi resirkulasi mampu meningkatkan kapasitas pengeringan sekaligus menurunkan konsumsi energi. Yang dan Kim (2025) melaporkan bahwa penggunaan *purge section* dapat meningkatkan efisiensi dehumidifikasi dan penghematan energi tahunan. Sementara itu, metode regenerasi berbasis *microwave* menunjukkan potensi peningkatan *coefficient of performance* (COP) dan distribusi panas yang lebih merata dibandingkan pemanasan konvensional (Ybyraiymkul *et al.* 2023). Kajian oleh Gorai, Singh, dan Jani (2024) menegaskan bahwa integrasi sistem *desiccant* dengan sumber panas alternatif dan konfigurasi *hybrid* berpotensi meningkatkan kinerja termal secara signifikan.

Berbagai penelitian terdahulu telah mengkaji secara luas pengaruh parameter operasi dan karakteristik material terhadap kinerja sistem dehumidifikasi berbasis *desiccant*. Namun demikian, sebagian besar penelitian masih menggunakan desain fisik rotor yang bersifat tetap, sehingga pengaruh variasi geometri rotor dan

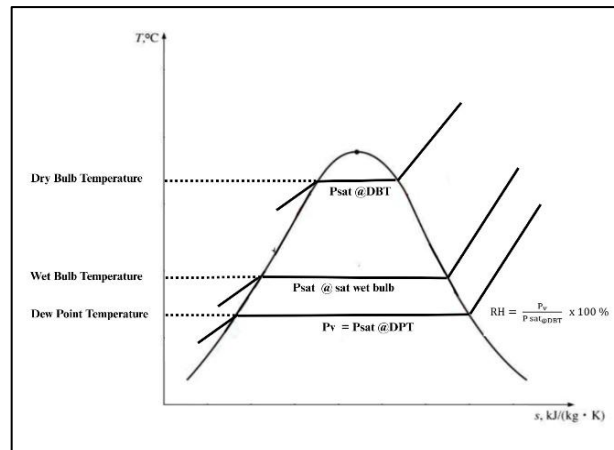
konfigurasi *test bed* terhadap performa sistem belum dievaluasi secara terpadu. Gorai, Singh, dan Jani (2024) menegaskan bahwa penelitian eksperimental yang mengintegrasikan aspek desain fisik, kondisi operasi, serta analisis konsumsi energi dalam satu sistem pengujian masih relatif terbatas. Berdasarkan kondisi tersebut, pengembangan *test bed dehumidifier* berbasis *desiccant* menjadi penting untuk mendukung evaluasi parameter operasi dan performa energi secara simultan. Pendekatan ini diharapkan mampu menghasilkan analisis yang lebih komprehensif sekaligus memberikan dasar pengembangan sistem yang sesuai untuk diaplikasikan pada wilayah dengan iklim panas dan lembap.

2.2.2 Karakteristik Udara Lembap

Dalam proses dehumidifikasi, kelembapan relatif udara menjadi salah satu parameter utama yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat kandungan uap air di dalam udara. Ketika temperatur udara meningkat, tekanan uap jenuh udara juga meningkat, sehingga nilai RH dapat menurun meskipun kandungan uap air aktual di udara belum berubah secara signifikan. Pengkondisian tersebut dapat dilihat pada Gambar 2. 4.

Berdasarkan diagram T-s pada Gambar 2. 4, tekanan uap aktual udara ditunjukkan oleh P_v yang diperoleh dari kondisi *dew point temperature* (DPT), yaitu saat udara mencapai keadaan jenuh sehingga tekanan uap aktual sama dengan tekanan uap jenuh pada titik embun. Sementara itu, $P_{sat}@DBT$ menunjukkan tekanan uap jenuh pada *dry bulb temperature* atau temperatur udara aktual. Nilai RH diperoleh dari perbandingan antara P_v dan $P_{sat}@DBT$. Ketika udara dipanaskan dari kondisi DPT menuju DBT, nilai $P_{sat}@DBT$ meningkat lebih cepat dibandingkan perubahan P_v , sehingga rasio

$P_v/P_{sat}@DBT$ menjadi lebih kecil dan RH menurun. Hal ini menunjukkan bahwa udara yang dipanaskan memiliki kemampuan lebih besar untuk menampung uap air sebelum mencapai kondisi jenuh. Fenomena tersebut menjadi dasar penting dalam sistem dehumidifier, khususnya pada proses regenerasi desiccant yang memanfaatkan udara bersuhu tinggi untuk melepaskan uap air dari material penyerap.



Gambar 2. 4 Representasi *relative humidity* pada diagram t–s udara lembap
(Sumber: <https://signalwires.com/what-is-a-ts-diagramn,d>.)

Pada Gambar 2. 4 terdapat beberapa parameter utama yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu:

- Dry Bulb Temperature* (DBT), yaitu temperatur udara yang diukur menggunakan termometer biasa dan ditunjukkan oleh garis vertikal pada diagram.
- Wet Bulb Temperature* (WBT) merupakan temperatur yang diukur ketika air menguap secara adiabatik ke dalam aliran udara.
- Relative Humidity* (RH), yaitu tingkat kejenuhan udara terhadap kandungan uap air yang ditunjukkan oleh garis lengkung dengan satuan persen (%).
- Partial Vapor Pressure* (P_v) merupakan tekanan parsial yang dihasilkan oleh uap

air yang terkandung di dalam udara.

- e. *Saturation Vapor Pressure* (Psat) merupakan tekanan maksimum uap air yang dapat ditampung udara pada temperatur tertentu.
- f. *Dew Point Temperature* (DPT), yaitu temperatur ketika udara mencapai kondisi jenuh dan mulai mengalami kondensasi.

1. Kelembapan Relatif (*Relative Humidity*)

Kelembapan relatif (RH) merupakan salah satu faktor lingkungan penting yang kerap kali diabaikan dalam pembahasan mengenai kualitas udara, baik di dalam maupun di luar ruangan. Kelembapan relatif (RH) didefinisikan sebagai jumlah uap air yang ada di udara, yang dinyatakan sebagai persentase dari jumlah yang dibutuhkan untuk pemenuhan kejenuhan pada suhu yang sama (Guarnieri et al., 2023). Nilai RH menunjukkan tingkat kejenuhan udara terhadap kandungan uap air dan dinyatakan dalam persen (%). Nilai RH sangat dipengaruhi oleh temperatur udara. Pada kandungan uap air yang tetap, peningkatan temperatur udara akan menyebabkan nilai RH menurun karena kemampuan udara untuk menampung uap air meningkat. Sebaliknya, penurunan temperatur udara akan meningkatkan nilai RH.

2. Kelembapan Absolut (*Humidity Ratio*)

Humidity ratio atau kelembapan absolut adalah perbandingan antara massa uap air yang terkandung dalam udara dengan massa udara kering pada kondisi yang sama (Gaikwad, 2026). Besaran ini menunjukkan jumlah aktual uap air di dalam udara dan umumnya dinyatakan dalam satuan kg uap air per kg udara kering. Nilai *humidity ratio* menunjukkan jumlah aktual uap air yang terkandung di dalam udara sehingga sering digunakan dalam analisis proses dehumidifikasi. Pada proses adsorpsi, nilai *humidity*

ratio udara keluaran akan lebih rendah dibandingkan udara masukan karena sebagian uap air diserap oleh material desiccant.

2.2.3 Perhitungan *sizing*

Perhitungan *sizing* dilakukan untuk menentukan dimensi dan spesifikasi komponen utama yang digunakan pada sistem dehumidifikasi. Perhitungan ini bertujuan agar setiap komponen yang dipilih dapat memenuhi kebutuhan operasi dan mendukung kinerja sistem secara optimal.

3. Volume *wheel*

Volume total *wheel* dihitung sebagai penjumlahan volume setiap bagian penyusunnya, yaitu *ring wheel*, *hub*, dan *spoke*. Oleh karena itu, volume *wheel* dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$V_{wheel} = V_{ring} + V_{hub} + V_{spoke} \quad (2.1)$$

Keterangan:

V_{wheel} : Volume *wheel* (m³)

V_{ring} : Volume *ring* (m³)

V_{hub} : Volume *hub* (m³)

V_{spoke} : Volume *spoke* (m³)

Adapun persamaan-persamaan yang dapat digunakan untuk melengkapi volume *wheel* dapat disajikan sebagai berikut.

a. Volume *ring*

Bagian *ring wheel* memiliki bentuk menyerupai tabung, sehingga perhitungan

volumenya menggunakan persamaan volume tabung. Berdasarkan yang dijelaskan oleh Risno, S.J. (2023), volume *ring* dinyatakan sebagai berikut.

$$V_{ring} = \pi \times Ri_{ring}^2 \times b \quad (2.2)$$

Keterangan:

Ri_{ring} : Jari – jari dalam *ring* (m)

b : Tebal *wheel* (m)

b. Volume hub

Hub berbentuk silinder berongga sehingga volumenya diperoleh dari selisih volume silinder luar dan silinder dalam. Berdasarkan yang dijelaskan oleh Risno, S.J. (2023), volume *hub* dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$V_{hub} = \frac{\pi}{4} \times (Do_{hub}^2 - Di_{hub}^2) \times b \quad (2.3)$$

Keterangan:

b : Tebal *wheel* (m)

Do_{hub} : Diameter luar *hub* (m)

Di_{hub} : Diameter dalam *hub* (m)

c. Volume spoke

Spoke memiliki bentuk yang dapat didekati sebagai balok, sehingga perhitungan volumenya menggunakan persamaan volume balok. Berdasarkan yang ditulis oleh Nuryanto (n.d.), volume *spoke* dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$V_{spoke} = l \times t \times b \quad (2.4)$$

Keterangan:

t : Tinggi *spoke* (m)

l : Panjang *spoke* (m)

b : Tebal *wheel* (m)

4. Massa *desiccant*

Massa *desiccant* menunjukkan jumlah adsorben yang tersedia untuk proses penyerapan uap air pada sistem dehumidifikasi. Besarnya massa *desiccant* berpengaruh terhadap kemampuan adsorpsi dan kapasitas pengeringan sistem. Berdasarkan hubungan antara *bulk density* dan volume *desiccant wheel* yang dijelaskan oleh Khan et al. (2017), massa *desiccant* dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$m_{des} = V_{wheel} \times \rho_{bulk} \quad (2.5)$$

Keterangan:

m_{des} : Massa *desiccant* (kg)

V_{wheel} : Volume *wheel* (m³)

ρ_{bulk} : Densitas kamba (*bulk density*) ($\frac{kg}{m^3}$)

5. Laju aliran volume pada sisi adsorpsi

Laju aliran volume adsorpsi ($\dot{V}_{ads}$) merupakan volume udara lembap yang mengalir melalui sisi adsorpsi *desiccant* per satuan waktu. Menurut Alvindocs (n.d.), laju aliran volume adsorpsi dapat dihitung berdasarkan hubungan antara kecepatan aliran dan luas permukaan *ducting* sebagaimana berikut ini.

$$\dot{V}_{ads} = v_{ads} \times A_{ads} \quad (2.6)$$

Keterangan:

$\dot{V}_{ads}$: Laju aliran volume pada sisi adsorpsi (m³/s)

v_{ads} : Kecepatan aliran udara pada sisi adsorpsi (m/s)

A_{ads} : Luas permukaan *ducting* sisi adsorpsi (m^2)

6. Laju aliran massa adsorpsi

Laju aliran massa udara adsorpsi merupakan jumlah massa udara lembap yang melewati *bed desiccant* pada sisi adsorpsi per satuan waktu. Menurut Iqbal et al. (2023), Laju aliran massa udara pada sisi adsorpsi dihitung berdasarkan hasil perkalian antara debit udara dan densitas udara lembap yang mengalir melalui *desiccant wheel*, sebagaimana berikut ini.

$$\dot{m}_{ads} = \dot{V}_{ads} \times \rho_{ads} \quad (2.7)$$

Keterangan:

$\dot{m}_{ads}$: Laju aliran massa udara yang diadsorpsi (kg/s)

$\dot{V}_{ads}$: Laju aliran volume pada sisi adsorpsi (m^3/s)

ρ_{ads} : Densitas udara lembap pada sisi adsorpsi ($\frac{kg}{m^3}$)

7. Laju aliran volume pada sisi regenerasi

Laju aliran volume regenerasi merupakan volume udara panas yang mengalir melalui sisi regenerasi *desiccant* per satuan waktu. Menurut Alvindocs (n.d.), laju aliran volume regenerasi dapat dihitung berdasarkan hasil perkalian antara kecepatan aliran udara dan luas penampang *ducting* sisi regenerasi, sebagaimana berikut.

$$\dot{V}_{reg} = v_{reg} \times A_{reg} \quad (2.8)$$

Keterangan:

$\dot{V}_{reg}$: Laju aliran volume pada sisi regenerasi (m^3/s)

v_{reg} : Kecepatan aliran udara pada sisi regenerasi (m/s)

A_{reg} : Luas permukaan *ducting* sisi regenerasi (m^2)

8. Laju aliran massa regenerasi

Laju aliran massa udara regenerasi ($\dot{m}_{\text{reg}}$) merupakan jumlah massa udara panas yang mengalir melalui sisi regenerasi *desiccant* per satuan waktu. Menurut Iqbal et al, (2023), laju aliran massa udara regenerasi dapat ditentukan hasil perkalian antara debit udara dan densitas udara yang mengalir melalui *desiccant wheel*, sebagaimana berikut.

$$\dot{m}_{\text{reg}} = \rho_{\text{reg}} \times \dot{V}_{\text{reg}} \quad (2.9)$$

Keterangan:

$\dot{m}_{\text{reg}}$: Laju aliran massa udara yang diregenerasi (kg/s)

ρ_{reg} : Densitas udara lembap pada sisi regenerasi ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)

$\dot{V}_{\text{reg}}$: Laju aliran volume pada sisi regenerasi ($\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$)

9. Daya *wheel*

Daya dibutuhkan untuk memutar *desiccant wheel* ditentukan berdasarkan torsi yang diperlukan dan kecepatan sudut *wheel* selama operasi. Menurut Engineering ToolBox (n.d), kebutuhan daya *wheel* dinyatakan sebagai berikut.

$$W_{\text{wheel}} = \tau \times \theta_2 \quad (2.10)$$

Keterangan:

W_{wheel} : Daya *wheel* (Watt)

τ : Torsi (Nm)

θ_2 : Kecepatan sudut (rad/s)

Adapun persamaan-persamaan yang dapat digunakan untuk melengkapi daya *wheel* dapat disajikan sebagai berikut.

a. Torsi

Menurut OpenStax (n.d.), torsi dihitung berdasarkan momen inersia *wheel* dan percepatan sudut yang dihasilkan selama proses percepatan awal, seperti berikut ini.

$$\tau = I_{\text{total}} \times \alpha \quad (2.11)$$

Keterangan:

I_{total} : Momen inersia total pada *rotary* (kg m²)

α : Percepatan sudut (rad/s²)

b. Momen inersia

Untuk menentukan momen inersia total pada *rotary*, dihitung dengan menggunakan momen inersia *wheel* ditambah momen inersia *desiccant*. Nilai momen inersia *wheel* dihitung dengan pendekatan silinder berongga. Untuk nilai momen inersia *desiccant* dihitung dengan pendekatan silinder pejal. Menurut OpenStax (n.d.), momen inersia *wheel* dan *desiccant* dinyatakan sebagai berikut.

$$I_{\text{wheel}} = \frac{1}{2} m_{\text{wheel}} \times (R_{\text{ring}}^2 + R_{\text{ring}}^2) \quad (2.12)$$

$$I_{\text{desiccant}} = \frac{1}{2} m_{\text{desiccant}} \times R_{\text{ring}}^2 \quad (2.13)$$

Maka momen inersia total pada *rotary wheel* adalah:

$$I_{\text{total}} = I_{\text{wheel}} + I_{\text{desiccant}} \quad (2.14)$$

Keterangan:

I_{wheel} : Momen inersia *wheel* (kg m²)

$I_{\text{desiccant}}$: Momen inersia *desiccant* (kg m²)

m_{wheel} : Massa *wheel* (kg)

$m_{desiccant}$: Massa *desiccant* (kg)

R_{oring} : jari – jari luar *ring* (m)

R_{iring} : jari – jari dalam *ring* (m)

c. Percepatan sudut

Percepatan sudut *wheel* diperoleh dari perubahan kecepatan sudut terhadap waktu percepatan. Menurut OpenStax (n.d.), percepatan sudut dinyatakan sebagai berikut.

$$\alpha = \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{t} \quad (2.15)$$

Keterangan:

α : percepatan sudut (rad/s²)

θ_2 : kecepatan sudut akhir (rad/s)

θ_1 : kecepatan sudut awal (rad/s)

t : waktu dalam 1 putaran (s)

d. Kecepatan sudut *wheel*

Untuk menentukan nilai percepatan sudut, terlebih dahulu harus diketahui kecepatan sudut *wheel*. Menurut OpenStax (n.d.), Kecepatan sudut dihitung berdasarkan putaran *wheel* per menit (*rotational speed*) sebagai berikut.

$$\theta = \frac{2\pi n}{60} \quad (2.16)$$

Keterangan:

θ : kecepatan sudut (rad/s)

n : kecepatan putaran (rpm)

e. Kecepatan putaran

Sedangkan nilai putaran *wheel* (n) diperoleh dari waktu yang dibutuhkan *wheel* untuk menyelesaikan satu putaran penuh. Menurut Mathwords (n.d.), hubungan antara putaran dan waktu ditunjukkan sebagai berikut.

$$n = \frac{60}{t} \quad (2.17)$$

Keterangan:

n : kecepatan putaran (rpm)

t : waktu dalam 1 putaran (s)

10. Daya *blower* adsorpsi

Daya *blower* pada sisi adsorpsi ditentukan berdasarkan laju aliran volumetrik udara dan total penurunan tekanan (*pressure drop*) yang terjadi sepanjang jalur aliran. Menurut Engineering ToolBox (n.d), daya *blower* adsorpsi dihitung sebagai berikut.

$$W_{blow_{ads}} = \dot{V}_{ads} \times \frac{\Delta Pa_{ads}}{\epsilon_{ads}} \quad (2.18)$$

Keterangan:

$W_{blow_{ads}}$: Daya *blower* adsorpsi (W)

$\dot{V}_{ads}$: Laju aliran volumetrik udara adsorpsi (m³/s)

ΔPa_{ads} : Total *pressure drop* sisi adsorpsi (Pa)

ϵ_{ads} : Efisiensi *blower* adsorpsi (%)

Adapun persamaan-persamaan yang dapat digunakan untuk melengkapi daya *blower* adsorpsi dapat disajikan sebagai berikut.

a. Total *pressure drop* adsorpsi

Total *pressure drop* tersebut merupakan akumulasi dari penurunan tekanan pada

ducting dan *desiccant wheel*.

$$\Delta Pa_{ads} = Pa_{duct_{ads}} + Pa_{wheel_{ads}} \quad (2.19)$$

Keterangan:

$Pa_{duct_{ads}}$: *Pressure drop ducting* adsorpsi (Pa)

$Pa_{wheel_{ads}}$: *Pressure drop desiccant wheel* adsorpsi (Pa)

b. Pressure drop pada ducting adsorpsi

Pressure drop pada *ducting* ditentukan berdasarkan nilai *friction loss* yang diperoleh dari diagram *air duct friction loss* dan panjang *ducting* yang digunakan. Menurut Engineering ToolBox (n.d), *pressure drop* karena *ducting* dihitung sebagai berikut.

$$Pa_{duct_{ads}} = Friction\ Loss_{ads} \times L_{ads} \quad (2.20)$$

Keterangan:

$Friction\ Loss_{ads}$: Kehilangan tekanan per satuan panjang duct (Pa/m)

L_{ads} : Panjang *ducting* (m)

c. Pressure drop pada wheel

Selain mengalami rugi tekanan pada *ducting*, aliran udara juga mengalami hambatan saat melewati *desiccant wheel*. Menurut Yadav and Yadav (2014), *pressure drop* pada *wheel* dihitung sebagai berikut.

$$Pa_{wheel_{ads}} = \frac{2f \times \rho_{ads} \times v_{ads}^2 \times b}{Dh_{ads}} + \frac{K_o \times \rho_{ads} \times v_{ads}^2}{2} \quad (2.21)$$

$$f = \frac{13}{Re} \quad (2.22)$$

$$Re = \frac{\rho_{ads} \times v_{ads} \times Dh_{ads}}{\mu_{ads}} \quad (2.23)$$

$$Dh_{ads} = \frac{4A_{ads}}{P_{ads}} \quad (2.24)$$

$$A_{ads} = \frac{1}{2} \pi r^2 \quad (2.25)$$

$$P_{ads} = \pi r \quad (2.26)$$

$$\mu_{ads} = \mu_o \left(\frac{T_{ads\ in}}{T_o} \right)^{\frac{3}{2}} \times \left(\frac{T_o + C}{T_{ads\ in} + C} \right) \quad (2.27)$$

Keterangan:

f : Faktor gesekan

ρ_{ads} : Massa jenis udara (kg/m³)

v_{ads} : Kecepatan udara (m/s)

b : Tebal *desiccant wheel* (m)

Dh_{ads} : Diameter hidrolik saluran (m)

Ko : Koefisien kehilangan tekanan lokal

Re : Bilangan Reynolds

μ_{ads} : Viskositas dinamis udara (Pa·s)

A_{ads} : Luas penampang aliran (m²)

P_{ads} : Keliling basah (m)

r : Jari-jari penampang (m)

μ_o : Viskositas referensi udara (Pa·s)

$T_{ads\ in}$: Temperatur udara (K)

T_o : Temperatur referensi (K)

C : Konstanta Sutherland (K)

11. Daya *blower* regenerasi

Daya *blower* pada sisi regenerasi dihitung berdasarkan laju aliran udara regenerasi dan total *pressure drop* yang terjadi pada sistem regenerasi. Menurut Engineering ToolBox (n.d), daya *blower* regenerasi dihitung sebagai berikut.

$$W_{blow_{reg}} = \dot{V}_{reg} \times \frac{\Delta Pa_{reg}}{\epsilon_{reg}} \quad (2.28)$$

Keterangan:

$W_{blow_{reg}}$: Daya *blower* regenerasi (W)

$\dot{V}_{reg}$: Laju aliran volumetrik udara regenerasi (m³/s)

ΔPa_{reg} : Total *pressure drop* sisi regenerasi (Pa)

ϵ_{reg} : Efisiensi *blower* regenerasi (%)

Adapun persamaan-persamaan yang dapat digunakan untuk melengkapi daya *blower* regenerasi dapat disajikan sebagai berikut.

a. Total *pressure drop* regenerasi

Total *pressure drop* regenerasi terdiri dari *pressure drop* pada *ducting*, *desiccant wheel*, dan *heater*.

$$\Delta Pa_{reg} = Pa_{duct_{reg}} + Pa_{wheel_{reg}} + Pa_{heater} \quad (2.29)$$

Keterangan:

$Pa_{duct_{reg}}$: *Pressure drop ducting* regenerasi (Pa)

$Pa_{wheel_{reg}}$: *Pressure drop desiccant wheel* regenerasi (Pa)

Pa_{heater} : *Pressure drop heater* (Pa)

b. *Pressure drop ducting* regenerasi

Pressure drop pada *ducting* regenerasi dihitung berdasarkan nilai *friction loss* dan panjang *ducting* yang digunakan.

$$Pa_{duct_{reg}} = Friction\ Loss \times L \quad (2.30)$$

Keterangan:

Friction Loss : Kehilangan tekanan per satuan panjang duct (Pa/m)

L : Panjang *ducting* (m)

c. ***Pressure drop wheel***

Penurunan tekanan pada *wheel* regenerasi dihitung menggunakan pendekatan yang sama dengan sisi adsorpsi. Menurut Yadav and Yadav (2014), *pressure drop* karena *wheel* dihitung sebagai berikut.

$$Pa_{wheel_{reg}} = \frac{2f \times \rho_{reg} \times v_{reg}^2 \times b}{Dh_{reg}} + \frac{Ko \times \rho_{reg} \times v_{reg}^2}{2} \quad (2.31)$$

$$f = \frac{13}{Re} \quad (2.32)$$

$$Re = \frac{\rho_{reg} \times v_{reg} \times Dh_{reg}}{\mu_{reg}} \quad (2.33)$$

$$Dh_{reg} = \frac{2ab}{a + b} \quad (2.34)$$

$$\mu_{reg} = \mu_o \left(\frac{T_{reg\ in}}{T_o} \right)^{\frac{3}{2}} \times \left(\frac{T_o + C}{T_{reg\ in} + C} \right) \quad (2.35)$$

Keterangan:

f : Faktor gesekan

ρ_{reg} : Massa jenis udara (kg/m³)

v : Kecepatan udara (m/s)

b : Tebal *desiccant wheel* (m)

Dh_{reg} : Diameter hidrolik saluran (m)

Ko : Koefisien kehilangan tekanan lokal

Re : Bilangan Reynolds

μ_{reg} : Viskositas dinamis udara (Pa·s)

a : lebar saluran (m)

b : Tinggi saluran (m)

μ_0 : Viskositas referensi udara (Pa·s)

$T_{reg\ in}$: Temperatur udara (K)

T_0 : Temperatur referensi (K)

C : Konstanta Sutherland (K)

d. *Pressure drop heater*

Selain *wheel*, aliran udara regenerasi juga mengalami hambatan saat melewati *heater*. Menurut Ai, Mak and Cui (2023), *pressure drop heater* dihitung sebagai berikut.

$$Pa_{heater} = \frac{f \times L_{heater} \times \rho_{reg} \times v_{reg}^2}{2 Dh_{reg}} + \frac{k \times \rho_{reg} \times v_{reg}^2}{2} \quad (2.36)$$

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (2.37)$$

$$Re = \frac{\rho_{reg} \times v_{reg} \times Dh_{reg}}{\mu_{reg}} \quad (2.38)$$

$$Dh_{reg} = \frac{2ab}{a + b} \quad (2.39)$$

$$\mu_{reg} = \mu_o \left(\frac{T_{reg\ in}}{T_o} \right)^{\frac{3}{2}} \times \left(\frac{T_o + C}{T_{reg\ in} + C} \right) \quad (2.40)$$

$$k = f \times N \quad (2.41)$$

Keterangan:

f : Faktor gesekan

L_{heater} : Panjang saluran *heater* (m)

ρ_{reg} : Massa jenis udara (kg/m³)

v_{reg} : Kecepatan udara (m/s)

$D_{h_{reg}}$: Diameter hidrolik saluran (m)

k : Koefisien kehilangan tekanan lokal

N : Jumlah tube *heater*

10. Diameter sproket

Diameter sproket *desiccant wheel* merupakan diameter lingkaran *pitch* sproket yang digunakan untuk mentransmisikan putaran dari motor penggerak ke rotor *desiccant wheel*. Menurut Tsubaki (n.d.), diameter sproket dapat dihitung berdasarkan jumlah gigi sproket dan *pitch* sabuk.

a. Diameter sproket *input*

$$D_{input} = \frac{Z_{input} \times p}{\pi} \quad (2.42)$$

Keterangan:

D_{input} : Diameter sproket *input* (mm)

Z_{input} : Jumlah gigi pada sproket *input*

p : *Pitch timing belt* (mm)

b. Diameter sproket *output*

$$D_{output} = \frac{Z_{output} \times p}{\pi} \quad (2.43)$$

Keterangan:

D_{output} : Diameter sproket *output* (mm)

Z_{output} : Jumlah gigi pada sproket *output*

p : *Pitch timing belt* (mm)

11. Panjang *timing belt*

Panjang *timing belt* (L) merupakan total panjang lintasan belt yang menghubungkan sproket penggerak dan sproket yang digerakkan pada sistem transmisi *desiccant wheel*. Menurut Tsubaki (n.d.), panjang *timing belt* dapat dihitung berdasarkan jarak antar poros dan diameter kedua sproket.

$$L_{belt} = 2C_{sproket} + \frac{\pi}{2}(D_{output} + D_{input}) + \frac{(D_{output} - D_{input})^2}{4C} \quad (2.44)$$

Keterangan:

L_{belt} : Panjang *timing belt* (mm)

$C_{sproket}$: Jarak antara pusat sproket input dan output (mm)

D_{output} : Diameter sproket output (mm)

D_{input} : Diameter sproket input (mm)

2.2.4 Perhitungan parameter

Perhitungan parameter dilakukan untuk menentukan besaran-besaran yang

digunakan dalam analisis kinerja sistem dehumidifikasi. Parameter yang diperoleh dari perhitungan ini selanjutnya digunakan sebagai dasar evaluasi performa alat selama proses pengujian.

1. Penurunan kelembapan absolut

Kapasitas penurunan kelembapan merupakan parameter yang digunakan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dehumidifikasi dalam menurunkan kandungan uap air pada udara proses. Parameter ini dinyatakan sebagai selisih kelembapan absolut udara antara sisi masuk dan sisi keluar zona adsorpsi. Menurut Iqbal et al. (2023), kapasitas penurunan kelembapan dapat dihitung sebagai berikut.

$$\Delta\omega_{\text{ads}} = \omega_{\text{ads,in}} - \omega_{\text{ads,out}} \quad (2.45)$$

Keterangan:

$\Delta\omega_{\text{ads}}$: Penurunan kelembapan absolut (kg/kg)

$\omega_{\text{ads,in}}$: *Humidity ratio* udara masuk sisi adsorpsi ($\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$)

$\omega_{\text{ads,out}}$: *Humidity ratio* udara keluar sisi adsorpsi ($\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$)

2. Moisture removal capacity

Moisture removal capacity menunjukkan laju penghilangan uap air oleh sistem *dehumidifier* selama proses adsorpsi. Besarnya MRC dipengaruhi oleh massa *desiccant* yang digunakan, kapasitas adsorpsi material, dan waktu adsorpsi. Hubungan tersebut dinyatakan oleh Mohammed et al. (2018).

$$\text{MRC} = \dot{m}_{\text{ads}} \times (\omega_{\text{ads,in}} - \omega_{\text{ads,out}}) \quad (2.46)$$

Keterangan:

MRC : *Moisture removal capacity* ($\frac{\text{kg}}{\text{s}}$)

$\dot{m}_{ads}$: Laju aliran massa udara yang diadsorpsi ($\frac{kg}{s}$)

$\omega_{ads,in}$: *Humidity ratio* udara masuk sisi adsorpsi ($\frac{kg}{kg}$)

$\omega_{ads,out}$: *Humidity ratio* udara keluar sisi adsorpsi ($\frac{kg}{kg}$)

3. *Moisture regeneration rate*

Menurut Mehare, et al (2025), *Moisture Regeneration Rate* (MRR) dihitung berdasarkan laju aliran massa udara regenerasi dan selisih *humidity ratio* udara keluar serta udara masuk pada sisi regenerasi.

$$MRR = \dot{m}_{reg} \times (\omega_{reg,out} - \omega_{reg,in}) \quad (2.47)$$

Keterangan:

MRR : *Moisture regeneration rate* ($\frac{kg}{s}$)

$\dot{m}_{reg}$: Laju aliran massa udara yang diregenerasi ($\frac{kg}{s}$)

$\omega_{reg,out}$: *Humidity ratio* udara masuk sisi regenerasi ($\frac{kg}{kg}$)

$\omega_{reg,in}$: *Humidity ratio* udara keluar sisi regenerasi ($\frac{kg}{kg}$)

4. Efektivitas dehumidifikasi

Menurut Rambhad et al (2023), efektivitas dehumidifikasi dihitung berdasarkan persentase penurunan *humidity ratio* udara antara kondisi masuk dan keluar pada sisi adsorpsi.

$$\epsilon_{deh} = \frac{\omega_{ads,in} - \omega_{ads,out}}{\omega_{ads,in}} \times 100 \% \quad (2.48)$$

Keterangan:

ϵ_{deh} : Efektivitas dehumidifikasi (%)

$\omega_{ads,in}$: *Humidity ratio* udara masuk sisi adsorpsi ($\frac{kg}{kg}$)

$\omega_{ads,out}$: *Humidity ratio* udara keluar sisi adsorpsi ($\frac{kg}{kg}$)

5. **Konsumsi daya heater**

Menurut Abdelgaied et al (2023), daya *heater* dihitung berdasarkan laju aliran massa udara regenerasi, kapasitas kalor udara, dan kenaikan suhu udara yang terjadi selama proses pemanasan.

$$W_{heater} = \dot{m}_{reg} \times C_p \times \Delta T_{heater} \quad (2.49)$$

Keterangan:

W_{heater} : Daya *heater* (Watt)

$\dot{m}_{reg}$: Laju aliran massa udara yang diregenerasi ($\frac{kg}{s}$)

C_p : Kapasitas kalor udara ($\frac{KJ}{kg^{\circ}C}$)

ΔT_{heater} : Perbedaan suhu *outlet* dan *inlet* pada *heater* ($^{\circ}C$)

6. **Dehumidification coefficient of performance**

Dehumidification Coefficient of Performance (DCOP) merupakan parameter yang digunakan untuk mengevaluasi efisiensi sistem dehumidifikasi dalam menghilangkan uap air dibandingkan dengan energi yang digunakan selama proses regenerasi. Menurut Alam dan Hussain (2022), nilai DCOP dapat dihitung sebagai berikut.

$$DCOP = \frac{\dot{m}_{ads} \times \Delta h_{vs} \times (\omega_{ads,in} - \omega_{ads,out})}{\dot{m}_{reg} \times C_p \times \Delta T_{heater}} \quad (2.50)$$

Dimana untuk mencari Δh_{vs} kita menggunakan rumus

$$\begin{aligned}
\Delta h_{vs} = & (-0,614342 \times 10^{-4}) \times T_{ads\ in}^3 \\
& + 0,0158927 \times 10^{-2} \times T_{ads\ in}^2 \\
& - 0,236418 \times 10 \times T_{ads\ in} \\
& + 0,250079 \times 10^4
\end{aligned} \tag{2.51}$$

Keterangan:

DCOP : Dehumidification coefficient of performance

$\dot{m}_{ads}$: Laju aliran massa udara yang diadsorpsi ($\frac{kg}{s}$)

Δh_{vs} : Energi laten penguapan air (kJ/kg)

$\omega_{ads,in}$: *Humidity ratio* udara masuk sisi adsorpsi ($\frac{kg}{kg}$)

$\omega_{ads,out}$: *Humidity ratio* udara keluar sisi adsorpsi ($\frac{kg}{kg}$)

$\dot{m}_{reg}$: Laju aliran massa udara yang diregenerasi ($\frac{kg}{s}$)

C_p : Kapasitas kalor udara ($\frac{KJ}{kg^\circ C}$)

ΔT_{heater} : Perbedaan suhu *outlet* dan *inlet* pada *heater* ($^\circ C$)

$T_{ads\ in}$: Suhu udara masuk sisi adsorpsi ($^\circ C$)

7. *Specific energy consumption*

Specific Energy Consumption (SEC) merupakan parameter yang menunjukkan jumlah energi yang dibutuhkan sistem dehumidifikasi untuk menghilangkan satu satuan massa uap air dari udara. Menurut Kosasih et al. (2022), nilai SEC dapat dihitung berdasarkan total konsumsi energi sistem dan *Moisture Removal Capacity* (MRC).

$$SEC = \frac{W_{heater} + W_{blower}}{MRC} \quad (2.52)$$

Keterangan:

SEC : *Specific energy consumption* (kJ/kg)

W_{heater} : Daya heater (kW)

W_{blower} : Daya blower (kW)

MRC : *Moisture removal capacity* (kg/s)

4.4.1 Heat Transfer pada Rotary Wheel

Perpindahan panas (*heat transfer*) adalah proses perpindahan energi termal dari suatu benda atau sistem yang memiliki temperatur lebih tinggi ke benda atau sistem lain yang memiliki temperatur lebih rendah akibat adanya perbedaan temperatur. Perpindahan panas akan berlangsung hingga tercapai kondisi kesetimbangan termal. Secara umum, perpindahan panas dapat terjadi melalui tiga mekanisme, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Analisis perpindahan panas pada penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan temperatur udara masuk dan keluar sebagai kondisi batas sistem. Temperatur permukaan dan temperatur internal *desiccant wheel* tidak diukur secara langsung sehingga perhitungan digunakan untuk menggambarkan kecenderungan perpindahan panas yang terjadi selama proses adsorpsi dan regenerasi. Menurut Aryadinata et al. (2017), perpindahan panas (*heat transfer*) dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.62) hingga (2.79).

a. *Heat transfer* konveksi adsorpsi di rotary wheel

$$Q_{conv,ads} = h_{ads} \times A_{v,ads} \times (T_{ads\ in} - T_{ads\ out}) \quad (2.54)$$

Untuk mencari h, menggunakan rumus:

$$h_{ads} = \frac{Nu \times k_{ads}}{Dh_{kanal}} \quad (2.55)$$

Untuk aliran laminar, nilai Nu menggunakan rumus:

$$Nu = 0,664Re^{0,5}Pr^{0,33} \quad (2.56)$$

Untuk aliran turbulen, nilai Nu menggunakan rumus:

$$Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^{0,4} \quad (2.57)$$

Untuk mencari nilai reynold, menggunakan rumus:

$$Re = \frac{\rho_{ads} \times v_{wheel,ads} \times Dh_{kanal}}{\mu_{ads}} \quad (2.58)$$

Untuk mencari v_{wheel} menggunakan rumus:

$$v_{wheel,ads} = \frac{\dot{V}_{duct,ads}}{A_{wheel,ads}} \quad (2.59)$$

Untuk mencari nilai Pr, menggunakan rumus:

$$Pr = \frac{\mu_{ads} Cp}{k_{ads}} \quad (2.60)$$

Untuk mencari k_{ads} , menggunakan tabel thermal conductivity.

Keterangan

$Q_{conv,ads}$: Laju perpindahan kalor konveksi pada adsorpsi (W)

h_{ads} : Koefisien perpindahan kalor konveksi adsorpsi ($W/m^2 K$)

$A_{v ads}$: Luas perpindahan kalor adsorpsi (m^2)

$T_{ads out}$: Temperatur udara keluar adsorpsi (K)

$T_{ads in}$: Temperatur udara masuk adsorpsi (K)

Nu : Bilangan nusselt

Re : Bilangan reynold

Pr : Bilangan prandtl

- ρ_{ads} : Massa jenis udara adsorpsi (kg/m^3)
- $v_{wheel,ads}$: Kecepatan udara di wheel adsorpsi (m/s)
- $Dh_{honeycomb}$: Diameter hidrolik honeycomb (m)
- μ_{ads} : Viskositas udara adsorpsi (Pa s)
- k_{ads} : Konduktivitas udara adsorpsi (W/mK)

b. *Heat transfer konveksi regenerasi di rotary wheel*

$$Q_{conv,reg} = h_{reg} \times A_{v reg} \times (T_{reg in} - T_{reg out}) \quad (2.61)$$

Untuk mencari h , menggunakan rumus:

$$h_{reg} = \frac{Nu \times k_{reg}}{Dh_{honeycomb}} \quad (2.62)$$

Untuk aliran laminar, nilai Nu menggunakan rumus:

$$Nu = 0,664 Re^{0,5} Pr^{0,33} \quad (2.63)$$

Untuk aliran turbulen, nilai Nu menggunakan rumus:

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad (2.64)$$

Untuk mencari nilai reynold, menggunakan rumus:

$$Re = \frac{\rho_{reg} \times v_{wheel,reg} \times Dh_{honeycomb}}{\mu_{reg}} \quad (2.65)$$

Untuk mencari $v_{wheel,reg}$ menggunakan rumus:

$$v_{wheel,reg} = \frac{\dot{V}_{duct,reg}}{A_{wheel,reg}} \quad (2.66)$$

Untuk mencari nilai Pr , menggunakan rumus:

$$Pr = \frac{\mu_{reg} Cp}{k_{reg}} \quad (2.67)$$

Untuk mencari k_{reg} , menggunakan tabel thermal conductivity.

Keterangan

$Q_{\text{conv,reg}}$	: Laju perpindahan kalor konveksi pada regenerasi (W)
h_{reg}	: Koefisien perpindahan kalor konveksi regenerasi (W/m ² K)
$A_{\text{v reg}}$	: Luas perpindahan kalor regenerasi (m ²)
$T_{\text{reg out}}$	: Temperatur udara keluar regenerasi (K)
$T_{\text{reg in}}$	: Temperatur udara masuk regenerasi(K)
Nu	: Bilangan nusselt
Re	: Bilangan reynold
$v_{\text{wheel,ads}}$	: Kecepatan udara di wheel regenerasi (m/s)
Pr	: Bilangan prandtl
ρ_{reg}	: Massa jenis udara reg (kg/m ³)
$Dh_{\text{honeycomb}}$	: Diameter hidrolik honeycomb (m)
μ_{reg}	: Viskositas udara reg (Pa s)
k_{reg}	: Konduktivitas udara reg (W/mK)

c. *Heat transfer* konduksi adsorpsi di rotary wheel

$$Q_{\text{konduksi,ads}} = k \times \frac{A (T_{\text{ads in}} - T_{\text{ads out}})}{b} \quad (2.68)$$

Untuk mencari A, kita menggunakan rumus:

$$A = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) \quad (2.69)$$

Keterangan

$Q_{\text{kond,ads}}$	: Laju perpindahan kalor (W)
k	: Konduktivitas termal silica gel (W/m K)

A : Luas perpindahan kalor adsorpsi (m²)

T_{ads out} : Temperatur udara keluar adsorpsi (K)

T_{ads in} : Temperatur udara masuk adsorpsi (K)

b : Ketebalan *Wheel*

d. *Heat transfer* konduksi regenerasi di *rotary wheel*

$$Q_{konduksi,reg} = k \times \frac{A (T_{reg in} - T_{reg out})}{L} \quad (2.70)$$

Untuk mencari A, kita menggunakan rumus:

$$A = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) \quad (2.71)$$

Keterangan

Q_{kond,ads} : Laju perpindahan kalor (W)

k : Konduktivitas termal silica gel (W/m K)

A : Luas perpindahan kalor regenerasi (m²)

T_{reg out} : Temperatur udara keluar regenerasi (K)

T_{reg in} : Temperatur udara masuk regenerasi (K)

b : Ketebalan *Wheel*

2.3 Material Desiccant White Silica Gel



Gambar 2. 5 *White silica gel*

(Sumber: PT. Damases Sejahtera)

White silica gel merupakan salah satu material *desiccant* berbasis silikon dioksida amorf (SiO_2) yang banyak diaplikasikan pada sistem *dehumidifier* karena memiliki kemampuan adsorpsi uap air yang tinggi. Bentuk fisik material ini ditunjukkan pada Gambar 2. 5. Secara umum, *white silica gel* berupa butiran kristal berwarna putih hingga bening dengan kandungan SiO_2 sekitar 98%. Selain memiliki sifat tidak beracun (*non-toxic*), material ini juga tidak bersifat korosif sehingga aman digunakan pada berbagai aplikasi dan tidak menimbulkan dampak yang merugikan bagi lingkungan. Efektivitas adsorpsinya didukung oleh struktur pori mikro dan meso yang menghasilkan luas permukaan spesifik sangat besar, sehingga molekul air dapat terikat dan tersimpan secara efisien melalui mekanisme adsorpsi fisik. Hraiech (2025) melaporkan bahwa *silica gel* memiliki luas permukaan spesifik sekitar 400–800 m^2/g dengan kapasitas adsorpsi sekitar 25% dari massa keringnya pada temperatur 25°C dan kelembapan relatif (RH) 50%. Nilai tersebut dapat meningkat hingga sekitar 40% ketika material dioperasikan pada kondisi kelembapan yang lebih tinggi.

Kemampuan adsorpsi *silica gel* dipengaruhi secara langsung oleh kondisi operasi selama proses dehumidifikasi berlangsung. Hraiech (2025) melaporkan bahwa penggunaan *silica gel* pada sistem dehumidifikasi mampu menurunkan *humidity ratio* sebesar 0,005–0,011 kg air/kg udara kering dengan efisiensi penyerapan yang melebihi 60%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa material ini memiliki kemampuan yang baik dalam mengurangi kandungan uap air pada aliran udara. Di sisi lain, penelitian Hasibuan dan Marbun (2018) menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan aliran udara dapat memperbesar laju adsorpsi karena semakin banyak molekul uap air yang berinteraksi dengan permukaan adsorben. Sebaliknya, kenaikan temperatur udara cenderung mengurangi kapasitas adsorpsi *silica gel* akibat meningkatnya kecenderungan molekul air untuk terlepas dari permukaan material. Oleh karena itu, pengaturan temperatur dan laju aliran udara menjadi aspek penting dalam memperoleh performa dehumidifikasi yang optimal.

Selain memiliki kemampuan adsorpsi yang tinggi, *silica gel* juga mempunyai karakteristik regenerasi yang baik karena dapat dipulihkan pada temperatur yang relatif rendah, yaitu sekitar 50–120°C (Rambhad, 2023). Kondisi tersebut memungkinkan proses regenerasi memanfaatkan berbagai sumber energi berbiaya rendah, seperti *heater* listrik, panas buang dari proses industri, maupun energi surya. Kemampuan adsorpsi yang efektif, stabilitas kimia yang tinggi, kemudahan proses regenerasi, serta tingkat keamanan penggunaannya menjadikan *white silica gel* sebagai salah satu material *desiccant* yang paling banyak diaplikasikan pada sistem HVAC, *desiccant wheel dehumidifier*, penyimpanan produk elektronik, industri farmasi, industri makanan, dan berbagai sistem pengendalian kelembapan lainnya.

Spesifikasi *white silica gel* yang digunakan sebagai media *desiccant* pada

penelitian ini disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Spesifikasi *silica gel* putih

Parameter	Nilai
Jenis <i>desiccant</i>	<i>Silica gel</i> putih
Kandungan SiO ₂	99,0%
Ukuran partikel	2 – 5 mm
<i>Bulk density</i>	775 kg/m ³
Kapasitas adsorpsi RH 20%	11,0%
Kapasitas adsorpsi RH 50%	27,3%
Kapasitas adsorpsi RH 90%	36,6%

(Sumber: Dalian Haixin Chemical Co., Ltd., 2024)