

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. Objek penelitian yang dikaji adalah sistem *dehumidifier* berbasis *rotating desiccant wheel*, yang bekerja melalui proses adsorpsi dan regenerasi untuk mengurangi kandungan uap air dalam udara. Kinerja sistem ini dipengaruhi oleh beberapa parameter utama, antara lain temperatur udara adsorpsi dan regenerasi, kelembapan relatif, laju aliran udara, serta konsumsi energi pada *heater*. Selain itu, pemilihan material *desiccant* berupa *silica gel* biru menjadi faktor penting yang menentukan kapasitas adsorpsi dan efisiensi sistem dehumidifikasi. Oleh karena itu, pada bab ini akan dibahas konsep dasar *dehumidifier*, perancangan *test bed* termasuk perhitungan *sizing*, serta karakteristik material *desiccant* sebagai dasar dalam analisis kinerja sistem pada penelitian ini.

2.1 Teknologi Pengendalian Kelembapan (*Dehumidifier*)

Pengendalian kelembapan udara merupakan aspek krusial dalam sistem industri modern karena banyak proses produksi memerlukan kondisi udara yang stabil dan terkontrol. Kelembapan udara mempengaruhi kenyamanan dan kesehatan makhluk hidup serta kondisi material dan mutu produk di dalam ruang tertutup (Kamsah et al., 2016; Pamungkas dan Sasongko, 2023). Kadar kelembapan yang tidak terkendali dapat memicu pertumbuhan mikroorganisme, menurunkan kualitas produk seperti makanan dan obat-obatan, serta mempercepat kerusakan material dan peralatan,

sehingga pengaturannya menjadi bagian integral dari pengendalian lingkungan proses. Untuk itu, industri menerapkan sistem *dehumidifier* yang dirancang beroperasi kontinu dengan kapasitas aliran udara besar dan keandalan tinggi, serta terintegrasi dengan sistem kontrol proses. Pemilihan teknologi *dehumidifier* mempertimbangkan kelembapan target, temperatur operasi, laju aliran udara, dan konsumsi energi, sementara sistem berbasis *desiccant* dilaporkan efektif mengurangi beban laten dan memungkinkan regenerasi pada temperatur relatif rendah dengan memanfaatkan energi dengan tingkat rendah (Jani, 2020). Oleh karena itu, pemahaman karakteristik teknologi *dehumidifier* menjadi dasar penting dalam perancangan dan analisis sistem industri.

2.1.1 Pengertian *Dehumidifier*

Dehumidifier merupakan perangkat yang berfungsi menurunkan kandungan uap air di udara melalui proses dehumidifikasi untuk mencegah dampak negatif terhadap kesehatan, kualitas produk, dan kondisi material akibat kelembapan yang buruk (Pamungkas dan Sasongko, 2023). Dalam sistem industri, pengendalian kelembapan berperan penting dalam menjaga mutu produk, mencegah korosi peralatan, serta mempertahankan kestabilan dan keandalan proses produksi. Secara umum, bentuk dan konfigurasi peralatan *dehumidifier* industri dapat dilihat pada Gambar 2. 1, yang menunjukkan integrasi antara unit pengolahan udara, sistem kontrol, serta komponen penunjang lainnya dalam satu kesatuan sistem. Secara teknis, dehumidifikasi melibatkan perpindahan panas dan massa melalui mekanisme kondensasi pada sistem refrigerasi atau adsorpsi pada sistem *desiccant*, di mana sistem *desiccant* mampu mengurangi beban laten dan sensibel secara signifikan meskipun meningkatkan

resistansi perpindahan massa (Jani, 2020). Perbedaan mekanisme ini menyebabkan variasi karakteristik performa dan kebutuhan energi, sehingga pemilihan sistem harus disesuaikan dengan kondisi operasi. Dalam penerapannya, *industrial dehumidifier* umumnya terintegrasi dengan sistem ventilasi dan pengondisian udara berbasis kontrol otomatis untuk mengatur temperatur, aliran udara, serta proses regenerasi atau pendinginan secara presisi guna mendukung operasi yang efisien dan berkelanjutan.



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

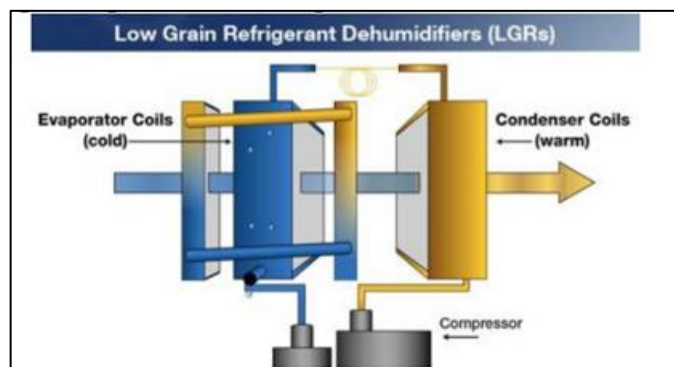
2.1.2 Jenis - Jenis *Dehumidifier* Skala Industri

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 tiga jenis utama, yaitu *dehumidifier* refrigerasi dan *dehumidifier desiccant*.

1. *Dehumidifier* Refrigerasi

Dehumidifier refrigerasi merupakan salah satu jenis *dehumidifier* yang paling umum digunakan karena pengoperasiannya relatif sederhana dan efektif untuk berbagai aplikasi, baik domestik maupun komersial. Jenis ini sangat sesuai digunakan pada lingkungan dengan temperatur udara yang cenderung hangat dan tingkat kelembapan relatif yang cukup tinggi (Kurniawan, Ruslani dan Anggriawan, 2017).

Secara teknis, cara kerja *dehumidifier* refrigerasi didasarkan pada prinsip siklus refrigerasi kompresi uap yang memanfaatkan komponen utama berupa evaporator dan kondensor. Alur proses tersebut dapat dilihat pada Gambar 2. 2, yang menunjukkan bahwa udara lembap dialirkan terlebih dahulu melalui evaporator sehingga mengalami penurunan temperatur hingga berada di bawah titik embun, menyebabkan uap air di dalam udara mengembun. Selain itu, pada siklus ini refrigeran berperan sebagai media perpindahan panas yang mengalami proses kompresi, kondensasi, ekspansi, dan evaporasi secara berulang, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2. 2, sehingga memungkinkan terjadinya proses dehumidifikasi secara kontinu dan efisien (Kurniawan, Ruslani dan Anggriawan, 2017).

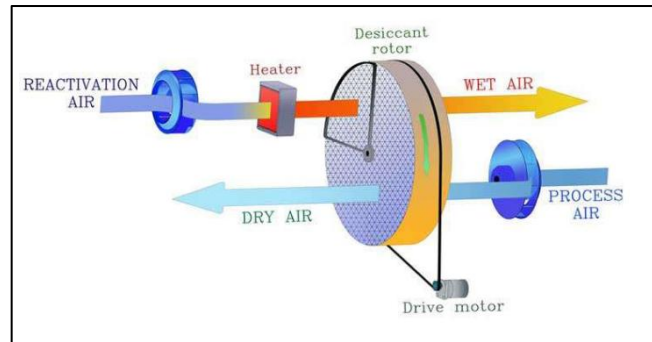


Gambar 2. 2 Proses *refrigerant dehumidifier*
(Sumber: Kurniawan, Ruslani dan Anggriawan, 2017)

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* dapat berbentuk padat atau cair dan diklasifikasikan sebagai adsorben yang mengikat uap air pada permukaan, serta absorben yang menyerap melalui perubahan struktur kimia, sehingga menghasilkan karakteristik perpindahan massa yang berbeda dibanding sistem refrigerasi (Surbakti, Yunianto dan Muchammad, 2024).

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).



Gambar 2. 3 Proses *desiccant dehumidifier*
(Sumber: <https://www.visionaq.com/methods-of-operation/>)

2.2 *Test bed Dehumidifier*

Test bed dehumidifier digunakan sebagai sarana pengujian untuk mengevaluasi kinerja sistem dehumidifikasi pada berbagai kondisi operasi. Melalui perangkat ini, pengaruh parameter seperti temperatur regenerasi, laju aliran udara, dan karakteristik material *desiccant* dapat dianalisis secara terkontrol. Pada bagian ini dibahas penelitian terdahulu terkait pengembangan *test bed dehumidifier* serta persamaan yang digunakan untuk menghitung parameter kinerja sistem.

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.

Kushwaha dan Kumar (2025), serta Yang et al. (2025) menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan putar dan pengaturan laju aliran udara secara signifikan memengaruhi *moisture removal capacity* (MRC) dan efisiensi adsorpsi. Yang et al., (2025) menjelaskan bahwa kenaikan temperatur regenerasi hingga sekitar 110 °C mampu meningkatkan kapasitas dehumidifikasi secara nyata ketika dikombinasikan dengan kecepatan putar optimum. Studi numerik juga memperlihatkan bahwa perubahan kelembapan relatif awal dan kecepatan udara secara langsung memengaruhi kapasitas adsorpsi aktual serta distribusi temperatur dalam sistem. Saputra et al. (2020) membuktikan bahwa pengendalian temperatur regenerasi secara konstan dapat menjaga stabilitas performa sistem saat terjadi fluktuasi beban panas. Temuan ini menegaskan bahwa parameter operasi memiliki pengaruh langsung terhadap kapasitas penghilangan kelembapan dan kinerja termal sistem.

Dari aspek material, sebagian besar penelitian menggunakan *silica gel* sebagai *desiccant* utama karena kestabilan termal dan karakteristik adsorpsinya pada kondisi udara lembap. Berdasarkan Al-Obaidi, Peterson, dan Hui (2022), *silica gel* menunjukkan kapasitas adsorpsi air sebesar 48,4% pada menit ke-45 dalam pengujian eksperimental, di mana sebanyak 0,484 g air terserap oleh 98,9 g *silica gel* ($\approx 4,9$ g/kg), sementara secara teoretis kapasitas penyerapan uap air maksimum material ini dapat mencapai sekitar, 40 kg air per kg *silica gel* (≈ 400 g/kg). Perbedaan antara kapasitas

adsorpsi eksperimental dan kapasitas teoretis maksimum menunjukkan adanya keterbatasan kinetika serta pengaruh perpindahan panas selama proses adsorpsi. Hal ini sejalan dengan Hraiech *et al.* (2025) yang melaporkan bahwa kenaikan suhu operasi menurunkan kapasitas adsorpsi *silica gel* akibat sifat adsorpsi uap air yang eksotermik. Nilai kapasitas tersebut juga konsisten dengan karakteristik fisik *silica gel* menurut Yeboah dan Darkwa (2021), terutama luas permukaan spesifik yang tinggi ($\approx 600,89 \text{ m}^2/\text{g}$) dan volume pori yang besar ($\approx 0,35 \text{ cm}^3/\text{g}$) berdasarkan hasil uji BET, yang mendukung kemampuan adsorpsi uap air. Namun, pelepasan panas adsorpsi yang tidak terkelola pada sistem *packed bed* dapat menurunkan kinerja adsorpsi aktual.

Temuan ini didukung oleh Hanif *et al.* (2023) yang menunjukkan bahwa meskipun *silica gel* RD memiliki kapasitas kesetimbangan tinggi hingga sekitar $0,38 \text{ kg/kg}$ pada RH 60% dan suhu sekitar 27°C , laju adsorpsi dan kapasitas efektifnya tetap dibatasi oleh fenomena kinetika, difusi massa, serta efek termal selama proses penyerapan. Oleh karena itu, kapasitas sekitar $\pm 4,9 \text{ g/kg}$ pada menit ke-45 yang dilaporkan oleh Al-Obaidi, Peterson, dan Hui (2022) mencerminkan kondisi operasional nyata yang dibatasi oleh waktu kontak, kenaikan temperatur, serta hambatan perpindahan massa dan panas; angka ini sekaligus menunjukkan bahwa hampir setengah dari massa uap air yang tersedia berhasil diserap, sehingga merepresentasikan kemampuan aktual *silica gel* dalam menangkap uap air pada kondisi 25°C dan kelembapan relatif 45%. Angka ini menunjukkan bahwa hampir setengah dari massa air yang tersedia berhasil diserap, sehingga mencerminkan kemampuan aktual material dalam menangkap uap air pada kondisi 25°C dan RH 45%. Selain itu, efisiensi dehumidifikasi 85% menggambarkan bahwa *silica gel* mampu menghilangkan 85% dari jumlah kelembapan yang perlu dihilangkan untuk

mencapai kondisi ideal, sehingga menunjukkan performa yang sangat baik dalam sistem dehumidifikasi berbasis *solid desiccant*.

Di sisi lain, pengembangan material komposit menunjukkan peningkatan performa dibandingkan material tunggal. (Behede, Chakrabarti dan Wankhede, 2024) menyatakan bahwa komposit *silica gel* CaCl_2 meningkatkan *moisture removal capacity* dan memperbaiki *dehumidification coefficient of performance*. Rambhad et al. (2023) juga menemukan bahwa kombinasi *silica gel* LiCl *molecular sieve* 5A menghasilkan laju adsorpsi yang lebih tinggi. Selain itu, penggunaan *synthesized metal silicate* menunjukkan performa lebih tinggi dalam konfigurasi regenerasi resirkulasi (Su et al., 2024). Selain itu, *dual desiccant coated heat exchanger* mampu meningkatkan *dehumidification coefficient of performance* (DCOP) hingga 0,41 (Liu et al., 2024). Hasil ini menunjukkan bahwa pemilihan material *desiccant* merupakan variabel strategis dalam perancangan sistem.

Selain parameter operasi dan material, konfigurasi sistem serta strategi regenerasi turut menentukan efisiensi energi dan stabilitas kinerja. Su et al. (2024) menunjukkan bahwa konfigurasi regenerasi resirkulasi mampu meningkatkan kapasitas pengeringan sekaligus menurunkan konsumsi energi dibandingkan konfigurasi konvensional. Sistem dengan *purge section* juga dilaporkan mampu meningkatkan efisiensi dehumidifikasi dan menghasilkan penghematan energi tahunan yang signifikan (Yang dan Kim, 2025). Inovasi metode regenerasi seperti pemanasan berbasis *microwave* menunjukkan potensi peningkatan *Coefficient of Performance* (COP) dan distribusi panas yang lebih merata dibanding pemanasan konvensional (Ybyraiymkul et al., 2023). Studi tinjauan oleh (Gorai, Singh dan Jani, 2024) menegaskan bahwa integrasi sistem *desiccant* dengan sumber panas alternatif

dan konfigurasi *hybrid* berpotensi meningkatkan kinerja termal secara signifikan.

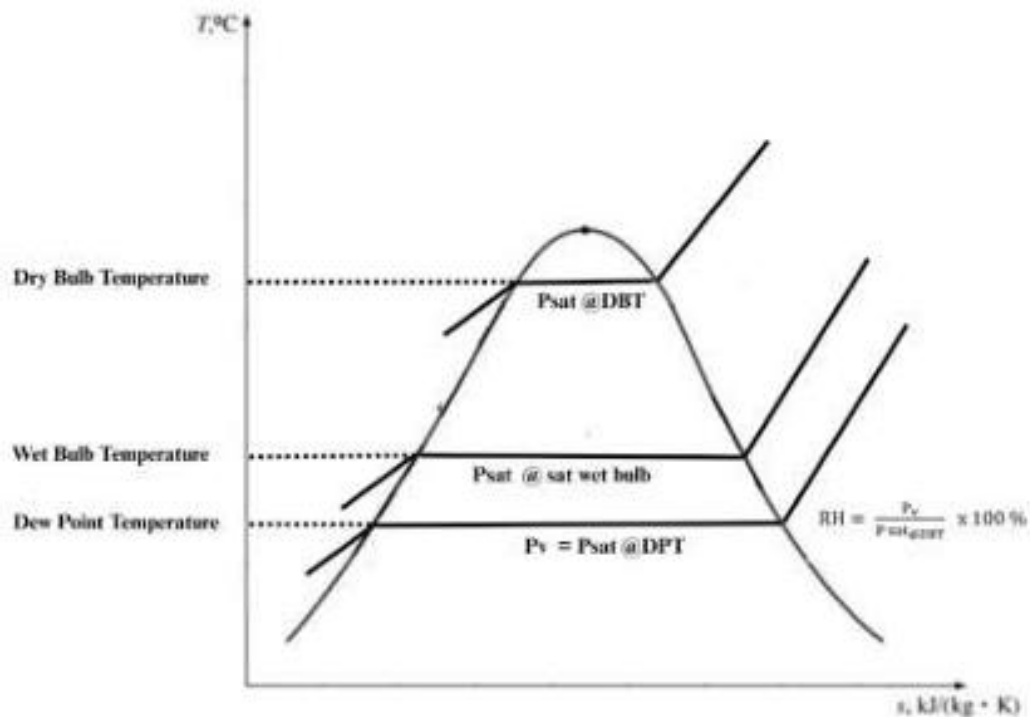
Meskipun berbagai penelitian telah mengevaluasi pengaruh parameter operasi dan material secara komprehensif, sebagian besar studi mempertahankan desain fisik rotor dalam kondisi tetap sehingga pengaruh desain geometris dan konfigurasi *test bed* belum dianalisis secara terintegrasi. Hal ini ditegaskan dalam kajian (Gorai, Singh dan Jani, 2024) yang menyatakan bahwa pendekatan eksperimental yang menggabungkan desain fisik, parameter operasi, dan analisis konsumsi energi dalam satu sistem uji masih terbatas. Oleh karena itu, pengembangan *test bed dehumidifier* berbasis *desiccant* yang memungkinkan evaluasi simultan terhadap parameter operasi dan performa energi menjadi penting untuk menghasilkan analisis yang lebih komprehensif dan aplikatif pada kondisi 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:

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

1. 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 dengan Persamaan (2.1).

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

Keterangan:

V_{wheel} : Volume *wheel* (m^3)

V_{ring} : Volume ring (m^3)

V_{hub} : Volume hub (m^3)

V_{spoke} : Volume spoke (m^3)

a. Volume Ring

Bagian ring *wheel* memiliki bentuk menyerupai tabung, sehingga perhitungan volumenya menggunakan persamaan volume tabung. Risno (2023) menyebutkan bahwa volume ring *wheel* dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.2).

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

Keterangan:

r : jari – jari (m)

b : tebal *wheel* (m)

b. Volume Hub

Hub berbentuk silinder berongga sehingga volumenya diperoleh dari selisih volume silinder luar dan silinder dalam. Risno (2023) menyebutkan bahwa volume hub dihitung menggunakan Persamaan (2.3).

$$V_{\text{hub}} = \frac{\pi}{4} \times (D_{\text{o hub}}^2 - D_{\text{i hub}}^2) \times b \quad (2.3)$$

Keterangan:

b : Tebal wheel (m)

$D_{\text{o hub}}$: Diameter luar hub (m)

$D_{\text{i hub}}$: Diameter dalam hub (m)

c. Volume Spoke

Spoke memiliki bentuk yang dapat didekati sebagai balok, sehingga perhitungan volumenya menggunakan persamaan volume balok. Nuryanto (n.d.) menyebutkan bahwa volume spoke dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.4).

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

Keterangan:

t : Tinggi spoke (m)

l : Panjang spoke (m)

b : Tebal wheel (m)

2. 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 dihitung menggunakan persamaan (2.5).

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

Keterangan:

V_{wheel} : Volume *wheel* (m³)

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

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

3. Laju Aliran Volume pada Sisi Adsorpsi

Laju aliran volume adsorpsi ($\dot{V}_{\text{ads}}$) 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 ditunjukkan pada persamaan (2.6).

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

Keterangan:

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

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

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

4. 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 ditunjukkan pada persamaan (2.7)

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

Keterangan:

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

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

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

5. 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 ditunjukkan pada persamaan (2.8).

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

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)

6. Laju Aliran Massa Regenerasi

Laju aliran massa udara regenerasi ($\dot{m}_{reg}$) 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 ditunjukkan pada persamaan (2.9).

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

Keterangan:

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

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

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

7. Daya Motor Listrik untuk Desiccant Wheel

Daya motor yang dibutuhkan untuk memutar desiccant wheel ditentukan berdasarkan torsi yang diperlukan dan kecepatan sudut wheel selama operasi. Oleh karena itu, kebutuhan daya wheel dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.10).

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

Keterangan:

W_{wheel} : Daya wheel (Watt)

τ : Torsi (Nm)

θ : Kecepatan sudut *wheel* (rad/s)

a. Torsi

Untuk memperoleh nilai daya wheel, terlebih dahulu perlu ditentukan nilai torsi yang bekerja pada wheel. Menurut Openstax (n.d.), torsi dihitung berdasarkan momen inersia wheel dan percepatan sudut yang dihasilkan selama proses percepatan awal, seperti pada Persamaan (2.11)

$$\tau = I \times \alpha \quad (2.11)$$

Keterangan:

I : Momen inersia (kg m^2)

α : Percepatan sudut (rad/s^2)

b. Momen Inersia

1) Momen Inersia Silinder Berongga

Nilai momen inersia desiccant wheel dihitung menggunakan pendekatan silinder berongga karena bentuk wheel menyerupai cakram dengan bagian tengah yang kosong. Menurut OpenStax (n.d.), momen inersia silinder berongga dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.12).

$$I = \frac{1}{2} m \times (R_{\text{ring}}^2 + R_{\text{i ring}}^2) \quad (2.12)$$

Keterangan:

m_{wheel} : Jumlah massa silica dan massa *wheel* (kg)

R_o ring : Jari-jari luar ring (m)

R_i Ring : Jari-jari dalam ring (m)

2) . Momen Inersia Silinder Pejal

Selain pendekatan silinder berongga, perhitungan momen inersia juga dilakukan menggunakan pendekatan silinder pejal untuk merepresentasikan bagian wheel yang dianggap memiliki distribusi massa merata pada seluruh penampang. Menurut OpenStax (n.d.), momen inersia silinder pejal dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.13).

$$I = \frac{1}{2} m \times R_{i_{ring}}^2 \quad (2.13)$$

Keterangan:

m_{des} : Jumlah massa silica dan massa *wheel* (kg)

R_i Ring : 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 dihitung menggunakan Persamaan (2.14).

$$\alpha = \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{t} \quad (2.14)$$

Keterangan:

α : Torsi (N/m)

θ_2 : Kecepatan sudut akhir (rad/s)

θ_2 : 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*) menggunakan Persamaan (2.15).

$$\theta = \frac{2\pi n}{60} \quad (2.15)$$

Keterangan:

θ : Kecepatan sudut (rad/s)

n : Kecepatan Putaran (rpm)

e. Kecepatan Putaran

Nilai putaran wheel (n) diperoleh dari waktu yang dibutuhkan wheel untuk menyelesaikan satu putaran penuh. Menurut Openstax (n.d.), hubungan antara putaran dan waktu ditunjukkan pada Persamaan (2.16).

$$n = \frac{60}{t} \quad (2.16)$$

Keterangan:

n : Kecepatan Putaran (rpm)

t : Waktu dalam 1 putaran (s)

8. 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 menggunakan Persamaan (2.17).

$$W_{\text{blow}_{\text{ads}}} = \dot{V}_{\text{ads}} \times \frac{\Delta P_{\text{ads}}}{\epsilon_{\text{ads}}} \quad (2.17)$$

Keterangan:

$W_{\text{blow}_{\text{ads}}}$: Daya blower adsorpsi (W)

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

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

ϵ_{ads} : Efisiensi blower adsorpsi (%)

a. Total pressure drop adsorpsi

Total penurunan tekanan tersebut merupakan akumulasi dari penurunan tekanan pada *ducting* dan *desiccant wheel* ditunjukkan pada Persamaan (2.18).

$$\Delta P_{\text{ads}} = P_{\text{a duct}_{\text{ads}}} + P_{\text{a wheel}_{\text{ads}}} \quad (2.18)$$

Keterangan:

$P_{\text{a duct}_{\text{ads}}}$: *Pressure drop ducting* adsorpsi (Pa)

$P_{\text{a wheel}_{\text{ads}}}$: *Pressure drop desiccant wheel* adsorpsi (Pa)

b. Pressure drop pada ducting adsorpsi

Penurunan tekanan 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 menggunakan Persamaan (2.19).

$$Pa_{duct_{ads}} = Friction Loss \times L_{ads} \quad (2.19)$$

Keterangan:

$Friction Loss_{ads}$: Kehilangan tekanan per satuan panjang ducting adsorpsi ($\frac{Pa}{m}$)

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

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 menggunakan Persamaan (2.20).

$$Pa_{wheel_{ads}} = \frac{2f \times \rho \times v^2 \times b}{Dh} + \frac{Ko \times \rho \times v^2}{2} \quad (2.20)$$

$$f = \frac{13}{Re} \quad (2.21)$$

$$Re = \frac{\rho \times v \times Dh}{\mu} \quad (2.22)$$

$$Dh = \frac{4A}{P} \quad (2.23)$$

$$A = \frac{1}{2} \pi r^2 \quad (2.24)$$

$$P = \pi r \quad (2.25)$$

$$\mu = \mu_o \left(\frac{T}{T_o} \right)^{\frac{3}{2}} \times \left(\frac{T_o + C}{T + C} \right) \quad (2.26)$$

Keterangan:

f : Faktor gesekan

ρ : Massa jenis udara (kg/m³)

v : Kecepatan udara (m/s)

- b : Tebal *desiccant wheel* (m)
- Dh : Diameter hidrolis saluran (m)
- Ko : Koefisien kehilangan tekanan lokal
- Re : Bilangan Reynolds
- μ : Viskositas dinamis udara (Pa·s)
- A : Luas penampang aliran (m²)
- P : Keliling basah (m)
- r : Jari-jari penampang (m)
- μ_0 : Viskositas referensi udara (Pa·s)
- T : Temperatur udara (K)
- To : Temperatur referensi (K)
- C : Konstanta Sutherland (K)

9. 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 menggunakan Persamaan (2.27).

$$W_{\text{blow}_{reg}} = \dot{V}_{reg} \times \frac{\Delta Pa_{reg}}{\epsilon_{reg}} \quad (2.27)$$

Keterangan:

- $W_{\text{blow}_{reg}}$: 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 (%)

a. Total pressure drop regenerasi

Total *pressure drop* regenerasi terdiri dari *pressure drop* pada *ducting*, *desiccant wheel*, dan *heater*. Menurut Engineering ToolBox (n.d), *pressure drop* karena *ducting* dihitung menggunakan Persamaan (2.28).

$$\Delta Pa_{reg} = Pa_{duct_{reg}} + Pa_{wheel_{reg}} + Pa_{heater} \quad (2.28)$$

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. Menurut Engineering ToolBox (n.d), *pressure drop* karena *ducting* dihitung menggunakan Persamaan (2.29).

$$Pa_{duct_{reg}} = Friction\ Loss \times L_{reg} \quad (2.29)$$

Keterangan:

$Friction\ Loss_{reg}$: Kehilangan tekanan per satuan panjang *ducting* regenerasi

$$\left(\frac{Pa}{m}\right)$$

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

c. Pressure drop wheel

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

drop pada *wheel* dihitung menggunakan Persamaan (2.30).

$$Pa_{wheel_{reg}} = \frac{2f \times \rho \times v^2 \times b}{Dh} + \frac{Ko \times \rho \times v^2}{2} \quad (2.30)$$

$$f = \frac{13}{Re} \quad (2.31)$$

$$Re = \frac{\rho \times v \times Dh}{\mu} \quad (2.32)$$

$$Dh = \frac{2ab}{a+b} \quad (2.33)$$

$$A = \frac{1}{2} \pi r^2 \quad (2.34)$$

$$\mu = \mu_o \left(\frac{T}{T_o} \right)^{\frac{3}{2}} \times \left(\frac{T_o + C}{T + C} \right) \quad (2.35)$$

Keterangan:

f : Faktor gesekan

ρ : Massa jenis udara (kg/m³)

v : Kecepatan udara (m/s)

b : Tebal *desiccant wheel* (m)

Dh : Diameter hidrolis saluran (m)

Ko : Koefisien kehilangan tekanan lokal

Re : Bilangan Reynolds

μ : Viskositas dinamis udara (Pa·s)

A : Luas penampang aliran (m²)

P : Keliling basah (m)

r : Jari-jari penampang (m)

μ_o : Viskositas referensi udara (Pa·s)

T : Temperatur udara (K)

T₀ : 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 menggunakan Persamaan (2.36).

$$Pa_{heater} = \frac{f \times L_{heater} \times \rho \times v^2}{2 D_h} + \frac{k \times \rho \times v^2}{2} \quad (2.36)$$

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (2.37)$$

$$Re = \frac{\rho \times v \times D_h}{\mu} \quad (2.38)$$

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

$$A = \frac{1}{2} \pi r^2 \quad (2.40)$$

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \times \left(\frac{T_0 + C}{T + C} \right) \quad (2.41)$$

$$k = f \times N \quad (2.42)$$

Keterangan:

f : Faktor gesekan

L_{heater} : Panjang saluran heater (m)

ρ : Massa jenis udara (kg/m³)

v : Kecepatan udara (m/s)

D_h : Diameter hidrolis saluran (m)

k : Koefisien kehilangan tekanan lokal

N : Jumlah *tube heater*

10. Daya Heater

Daya *heater* digunakan untuk menaikkan temperatur udara regenerasi hingga mencapai temperatur regenerasi yang diinginkan. Besarnya daya heater ditentukan berdasarkan laju aliran massa udara regenerasi dan perubahan entalpi udara selama proses pemanasan. Menurut Saputra (2025), kebutuhan daya *heater* dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.43).

$$Q_{heater} = \dot{m}_{reg} \times \Delta h \quad (2.43)$$

Keterangan:

Q_{heater} : Daya heater (kW)

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

Δh : Perubahan entalpi udara (kJ/kg)

Perubahan entalpi udara regenerasi dihitung menggunakan Persamaan (2.44).

$$\Delta h = h_{out} - h_{in} \quad (2.44)$$

Keterangan:

h_{out} : Entalpi udara keluar *heater* (kJ/kg)

h_{in} : Entalpi udara masuk *heater* (kJ/kg)

Laju aliran massa udara regenerasi diperoleh dari laju aliran volumetrik udara regenerasi dan massa jenis udara sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2.45).

$$\dot{m}_{reg} = \dot{V}_{reg} \rho_{reg} \quad (2.45)$$

Keterangan:

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

ρ_{reg} : Massa jenis udara regenerasi (kg/m³)

Laju aliran volumetrik udara regenerasi dihitung menggunakan Persamaan (2.46).

$$\dot{V}_{reg} = v_{reg} A \quad (2.46)$$

Keterangan:

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

A : Luas penampang aliran (m²)

Luas penampang aliran dihitung menggunakan Persamaan (2.47).

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (2.47)$$

Keterangan:

d : Diameter saluran udara (m)

Kebutuhan kalor untuk penguapan uap air di dalam *desiccant* dihitung menggunakan

Persamaan (2.48).

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{air}} \times \Delta h_{\text{vs}} \quad (2.48)$$

Keterangan:

$\dot{Q}$: Kalor penguapan (kW)

$\dot{m}_{\text{air}}$: Laju massa air yang terdesorpsi (kg/s)

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

Laju massa air yang terdesorpsi dihitung menggunakan Persamaan (2.49).

$$\dot{m}_{\text{air}} = \dot{m}_{\text{udara}} \times \Delta \omega \quad (2.49)$$

Keterangan:

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

$\Delta \omega$: Perubahan *humidity ratio* (kg/kg)

Perubahan *humidity ratio* dihitung menggunakan Persamaan (2.50).

$$\Delta \omega = \omega_{\text{out}} - \omega_{\text{in}} \quad (2.50)$$

Keterangan:

ω_{out} : *Humidity ratio* udara keluar (kg/kg)

ω_{in} : *Humidity ratio* udara masuk (kg/kg)

Dimana untuk mencari Δh_{vs} , menggunakan Persamaan (2.51).

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

Keterangan:

ω_{out} : Diameter saluran udara (m)

ω_{in} : Diameter saluran udara (m)

11. Diameter Sprocket

Diameter *sprocket desiccant wheel* merupakan diameter lingkaran *pitch sprocket* yang digunakan untuk mentransmisikan putaran dari motor penggerak ke rotor *desiccant wheel*. Menurut Tsubaki (n.d.), diameter sprocket dapat dihitung berdasarkan jumlah gigi sprocket dan *pitch* sabuk, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2.52) dan (2.53).

a. Diameter sprocket input

$$D\ input = \frac{Z\ input \times p}{\pi} \quad (2.52)$$

Keterangan :

D input : Jumlah *sprocket* input (mm)

Z input : Jumlah gigi pada *sprocket* input

p : *Pitch timing belt* (mm)

b. Diameter *sprocket* output

$$D \text{ output} = \frac{Z \text{ output} \times p}{\pi} \quad (2.53)$$

Keterangan:

D output : Jumlah *sprocket* output (mm)

Z output : Jumlah gigi pada *sprocket* output

p : *Pitch timing belt* (mm)

12. Panjang *Timing Belt*

Panjang *timing belt* (*L*) merupakan total panjang lintasan *belt* yang menghubungkan *sprocket* penggerak dan *sprocket* yang digerakkan pada sistem transmisi *desiccant wheel*. Menurut Tsubaki (n.d.), panjang *timing belt* dapat dihitung berdasarkan jarak antar poros dan diameter kedua *sprocket*, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2.54).

$$L = 2C + \frac{\pi}{2}(D \text{ output} + D \text{ input}) + \frac{(D \text{ output} - D \text{ input})^2}{4C} \quad (2.54)$$

Keterangan:

L : Panjang *timing belt* (mm)

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

D input : Diameter *sprocket* input (mm)

D output : Diameter *sprocket* output (mm)

2.2.4 Perhitungan Parameter

1. Penurunan Kelembapan Relatif

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 menggunakan Persamaan (2.55).

$$\Delta\omega_{\text{ads}} = \omega_{\text{ads,in}} - \omega_{\text{ads,out}} \quad (2.55)$$

Keterangan:

$\Delta\omega_{\text{ads}}$: Penurunan kelembapan relatif (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 (MRC)

Moisture Removal Capacity (MRC) 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) pada persamaan (2.56).

$$\text{MRC} = \dot{m}_{\text{ads}} \times (\omega_{\text{ads,in}} - \omega_{\text{ads,out}}) \quad (2.56)$$

Keterangan:

MRC : Moisture Removal Capacity ($\frac{\text{kg}}{\text{s}}$)

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

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

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

3. *Moisture Regeneration Rate (MRR)*

Moisture Regeneration Rate (MRR) dihitung berdasarkan laju aliran massa udara regenerasi dan selisih humidity ratio udara keluar serta udara masuk pada sisi regenerasi, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2.57).

$$MRR = \dot{m}_{reg} \times (\omega_{reg,out} - \omega_{reg,in}) \quad (2.57)$$

Keterangan:

MRR : Moisture Regeneration Rate $\left(\frac{kg}{s}\right)$

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

$\omega_{reg,in}$: Humidity ratio udara masuk sisi regenerasi $\left(\frac{kg}{kg}\right)$

$\omega_{reg,out}$: Humidity ratio udara keluar sisi regenerasi $\left(\frac{kg}{kg}\right)$

4. *Efektivitas Dehumidifikasi*

Efektivitas dehumidifikasi dihitung berdasarkan persentase penurunan humidity ratio udara antara kondisi masuk dan keluar pada sisi adsorpsi, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2.58).

$$\varepsilon_{deh} = \frac{\omega_{ads,in} - \omega_{ads,out}}{\omega_{ads,in}} \times 100 \% \quad (2.58)$$

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

Daya heater dihitung berdasarkan laju aliran massa udara regenerasi, kapasitas kalor udara, dan kenaikan suhu udara yang terjadi selama proses pemanasan, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2.59).

$$W_{heater} = \dot{m}_{reg} \times C_p \times \Delta T_{heater} \quad (2.59)$$

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 (DCOP)

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 menggunakan Persamaan (2.60).

$$DCOP = \frac{\dot{m}_{ads} \times \Delta h_{vs} \times (\omega_{ads,in} - \omega_{ads,out})}{\dot{m}_{reg} \times C_p \times \Delta T_{heater}} \quad (2.60)$$

Dimana untuk mencari Δh_{vs} kita menggunakan Persamaan (2.51).

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

Keterangan:

DCOP : *Dehumidification coefficient of performance*

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

$\dot{m}_{ads}$: 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 ($\frac{kg}{kg}$)

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

Cp : 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), sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2.61).

$$SEC = \frac{W_{heater} + W_{blower}}{MRC} \quad (2.61)$$

Keterangan

SEC : Specific Energy Consumption (SEC) (kJ/kg)

W_{heater} : Daya heater (kW)

W_{blower} : Daya blower (kW)

MRC : *Moisture Removal Capacity* (kg/s)

8. *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*

$$Q_{\text{conv,ads}} = h_{\text{ads}} \times A_v \times (T_{\text{ads in}} - T_{\text{ads out}}) \quad (2.62)$$

Untuk mencari h , menggunakan rumus:

$$h_{\text{ads}} = \frac{\text{Nu} \times k_{\text{ads}}}{Dh_{\text{kanal}}} \quad (2.63)$$

Untuk aliran laminar, nilai Nu menggunakan rumus:

$$\text{Nu} = 0,664\text{Re}^{0,5}\text{Pr}^{0,33} \quad (2.64)$$

Untuk aliran turbulen, nilai Nu menggunakan rumus:

$$Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^{0,4} \quad (2.65)$$

Untuk mencari nilai reynold, menggunakan rumus:

$$Re = \frac{\rho_{ads} \times v_{wheel,ads} \times Dh_{kanal}}{\mu_{ads}} \quad (2.66)$$

Untuk mencari v_{wheel} menggunakan rumus:

$$v_{wheel,ads} = \frac{\dot{V}_{duct,ads}}{A_{wheel,ads}} \quad (2.67)$$

Untuk mencari nilai Pr, menggunakan rumus:

$$Pr = \frac{\mu_{ads} C_p}{k_{ads}} \quad (2.68)$$

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

Keterangan

$Q_{conv,ads}$	: Laju perpindahan kalor konveksi adsorpsi (J/s)
h_{ads}	: Koefisien perpindahan kalor konveksi adsorpsi (W/m ² K)
A_v	: 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

$Dh_{\text{honeycomb}}$: 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*

$$Q_{\text{conv,reg}} = h_{\text{reg}} \times A_v \times (T_{\text{reg in}} - T_{\text{reg out}}) \quad (2.69)$$

Untuk mencari h , menggunakan rumus:

$$h_{\text{reg}} = \frac{Nu \times k_{\text{reg}}}{Dh_{\text{honeycomb}}} \quad (2.70)$$

Untuk aliran laminar, nilai Nu menggunakan rumus:

$$Nu = 0,664 Re^{0,5} Pr^{0,33} \quad (2.71)$$

Untuk aliran turbulen, nilai Nu menggunakan rumus:

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad (2.72)$$

Untuk mencari nilai reynold, menggunakan rumus:

$$Re = \frac{\rho_{\text{reg}} \times v_{\text{wheel,reg}} \times Dh_{\text{honeycomb}}}{\mu_{\text{reg}}} \quad (2.73)$$

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

$$v_{\text{wheel,reg}} = \frac{\dot{V}_{\text{duct,reg}}}{A_{\text{wheel,reg}}} \quad (2.74)$$

Untuk mencari nilai Pr , menggunakan rumus:

$$Pr = \frac{\mu_{\text{reg}} Cp}{k_{\text{reg}}} \quad (2.75)$$

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

Keterangan

$Q_{conv,reg}$	: Laju perpindahan kalor konveksi regenerasi (W)
h_{reg}	: Koefisien perpindahan kalor konveksi regenerasi ($W/m^2 K$)
A_v	: Luas perpindahan kalor regenerasi (m^2)
$T_{reg out}$	: Temperatur udara keluar regenerasi (K)
$T_{reg in}$	: Temperatur udara masuk regenerasi(K)
Nu	: Bilangan nusselt
Re	: Bilangan reynold
Pr	: Bilangan prandtl
ρ_{reg}	: Massa jenis udara reg (kg/m^3)
$Dh_{honeycomb}$	: 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*

$$Q_{konduksi,ads} = k \times \frac{A (T_{ads in} - T_{ads out})}{L} \quad (2.76)$$

Untuk mencari A, kita menggunakan rumus:

$$A = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) \quad (2.77)$$

Keterangan

$Q_{kond,ads}$	: Laju perpindahan kalor kalor konduksi adsorpsi (J/s)
k	: Konduktivitas termal silica gel ($W/m K$)
A	: Luas perpindahan kalor adsorpsi (m^2)

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

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

L : Ketebalan *Wheel*

d. *Heat Transfer Konduksi pada sisi Regenerasi*

$$Q_{konduksi, reg} = k \times \frac{A (T_{reg\ in} - T_{reg\ out})}{L} \quad (2.78)$$

Untuk mencari A, kita menggunakan rumus:

$$A = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) \quad (2.79)$$

Keterangan

$Q_{kond, reg}$: Laju perpindahan kalor konduksi regenerasi (J/s)

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)

L : Ketebalan *Wheel*

2.3 Material *Desiccant*

Material *desiccant* merupakan bahan utama yang digunakan dalam sistem *dehumidifier* untuk menyerap uap air dari udara sehingga kelembapan udara dapat diturunkan. 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).

Silica gel biru merupakan material *desiccant* adsorben padat berbasis silikon dioksida amorf (SiO_2) yang banyak digunakan pada sistem dehumidifikasi karena memiliki struktur pori dan luas permukaan spesifik yang tinggi, yaitu sekitar 400–800 m^2/g (Hraiech, 2025), sehingga menyediakan banyak situs aktif untuk mengikat molekul air. Situs aktif adalah bagian pada permukaan adsorben yang berperan sebagai lokasi terjadinya adsorpsi. Struktur pori *silica gel* biru yang memiliki banyak situs aktif memungkinkan adsorpsi uap air secara efektif melalui gaya fisik pada permukaannya, sementara indikator warna yang berubah dari biru menjadi merah muda saat jenuh memudahkan pemantauan kondisi adsorben.

Silica gel biru memiliki kapasitas adsorpsi yang baik, dengan kemampuan menyerap air hingga sekitar 25–40% dari massa keringnya tergantung kondisi kelembapan udara (Hraiech, 2025). Kinerja adsorpsinya dipengaruhi oleh temperatur dan kondisi aliran udara. Peningkatan temperatur cenderung menurunkan kapasitas adsorpsi karena molekul air lebih mudah terlepas dari permukaan adsorben. Sebaliknya, peningkatan aliran udara dapat mempercepat proses adsorpsi, meskipun dapat menyebabkan adsorben lebih cepat mencapai kondisi jenuh.

Proses adsorpsi uap air pada *silica gel* merupakan proses eksotermis dengan panas adsorpsi sekitar 40–42 kJ/mol (Hraiech, 2025). Selama proses adsorpsi berlangsung, pelepasan panas menyebabkan temperatur *silica gel* cenderung meningkat. Seiring bertambahnya jumlah molekul air yang terikat pada permukaan

adsorben, jumlah situs aktif yang tersedia akan semakin berkurang hingga akhirnya *silica gel* mencapai kondisi jenuh. Pada kondisi ini, kemampuan *silica gel* untuk mengadsorpsi uap air akan menurun secara signifikan.

Untuk mengembalikan kapasitas adsorpsinya, *silica gel* perlu diregenerasi dengan mengalirkan udara panas sehingga molekul air yang tersimpan pada permukaan adsorben dapat terlepas kembali ke udara. Salah satu keunggulan utama *silica gel* biru adalah kemampuannya untuk diregenerasi pada temperatur relatif rendah, yaitu sekitar 50–120 °C (Rambhad et al., 2023). Selain itu, material ini memiliki stabilitas kimia yang baik, tidak beracun, tahan terhadap kelembapan tinggi, serta dapat digunakan baik sebagai desiccant tunggal maupun sebagai material dasar dalam komposit *desiccant*.

Berdasarkan karakteristik adsorpsi yang baik, kemampuan regenerasi pada temperatur rendah, kestabilan material, serta kemudahan identifikasi tingkat kejenuhan melalui perubahan warna biru menjadi merah muda, *silica gel* biru dipilih sebagai material *desiccant* pada penelitian rancang bangun *test bed dehumidifier* ini. Adapun spesifikasi dari *silica gel* biru dapat dilihat pada Tabel 2. 1.

Tabel 2. 1 Spesifikasi material *desiccant silica gel* biru

Nama produk	:	<i>Silica gel</i> biru
Bentuk	:	<i>Beads</i> (butiran bulat)
Diameter	:	2.0 - 4.0 mm
pH	:	4 – 8
Kekuatan spesifik	:	>3000 Ω .cm
Kapasitas penyerapan kelembapan	:	20% RH: >8%
	:	50% RH: >20%
	:	90% RH: >30%

(Sumber: Douyee, n.d)