

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*)

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

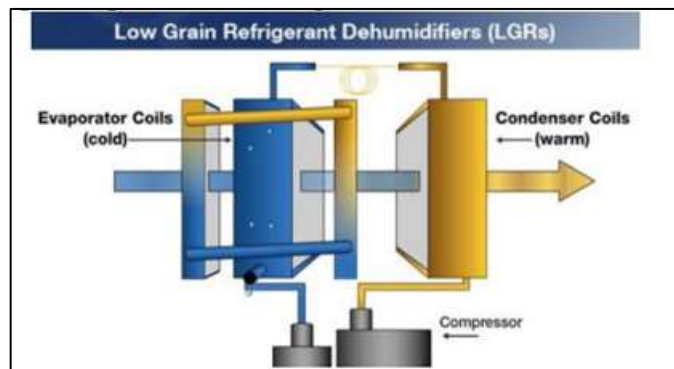
Dehumidifier skala industri dapat diklasifikasikan berdasarkan prinsip kerja yang digunakan dalam mengurangi kandungan uap air di udara. Klasifikasi ini menentukan mekanisme pemisahan uap air, karakteristik performa sistem, serta kesesuaian aplikasi pada berbagai kondisi operasi industri. Secara umum, *dehumidifier* industri terbagi menjadi 2 jenis, 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).



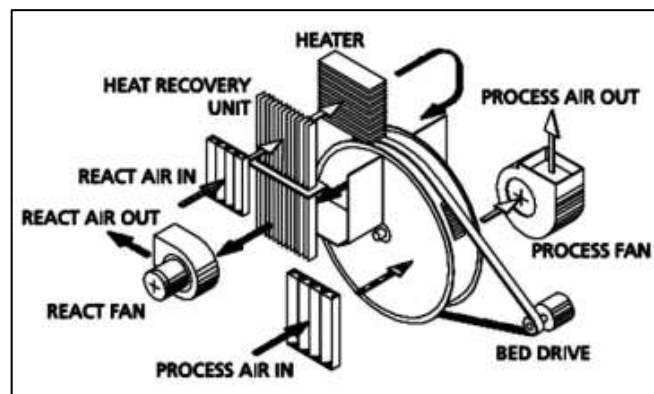
Gambar 2.2 Proses *refrigerant dehumidifier*
(Sumber: Kurniawan, Ruslani dan Anggriawan, 2017)

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: Kamsah et al., 2016)

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* dipengaruhi oleh temperatur regenerasi, laju aliran

udara adsorpsi dan regenerasi, serta rasio aliran udara. Yudhi Kurniawan (2017) menjelaskan bahwa kelembapan relatif *atau relative humidity* (RH) merupakan salah satu sifat termodinamika udara yang menyatakan perbandingan tekanan uap parsial terhadap tekanan uap jenuh, pada suhu konstan yang hasilnya dinyatakan dalam satuan %. Suhu panas dapat menyebabkan penurunan Rh dikarenakan adanya perubahan pada tekanan uap jenuh. Temperatur regenerasi merupakan parameter penting karena berpengaruh langsung terhadap proses desorpsi uap air dari material. Semakin tinggi temperatur regenerasi, semakin besar energi yang tersedia untuk melepaskan uap air sehingga kapasitas adsorpsi pada siklus berikutnya meningkat, meskipun peningkatan temperatur yang terlalu tinggi dapat menurunkan efisiensi energi sistem. Beberapa penelitian melaporkan bahwa temperatur regenerasi umumnya berada pada rentang 40–120°C, tergantung pada jenis *desiccant* dan konfigurasi sistem. Yu et al. (2022) menunjukkan bahwa variasi temperatur regenerasi 40–70°C 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 berpengaruh signifikan terhadap *moisture removal capacity* (MRC) dan efisiensi adsorpsi. Yang et al. (2025) melaporkan bahwa kenaikan temperatur regenerasi hingga sekitar 110°C mampu meningkatkan kapasitas dehumidifikasi ketika dikombinasikan dengan kecepatan putar optimum. Selain itu, studi numerik menunjukkan bahwa kelembapan relatif awal dan kecepatan udara memengaruhi kapasitas adsorpsi aktual dan distribusi temperatur sistem. Saputra et al. (2020) juga membuktikan bahwa pengendalian temperatur regenerasi yang konstan mampu menjaga stabilitas performa sistem saat terjadi fluktuasi beban panas.

Dari aspek material, *silica gel* masih menjadi *desiccant* yang paling banyak digunakan karena kestabilan termal dan karakteristik adsorpsinya pada kondisi udara lembap. Al Obaidi, Peterson, dan Hui (2022) melaporkan bahwa *silica gel* mampu menyerap air sebesar 48,4% pada menit ke-45, yaitu sekitar 0,484 g air per 98,9 g *silica gel* ($\approx 4,9$ g/kg), sedangkan kapasitas adsorpsi teoritis maksimum dapat mencapai sekitar 400 g/kg. Perbedaan ini menunjukkan adanya keterbatasan kinetika serta pengaruh perpindahan panas selama proses adsorpsi. Hasil tersebut sejalan dengan Hraiech et al. (2025), yang menyatakan bahwa peningkatan suhu operasi menurunkan kapasitas adsorpsi *silica gel* akibat sifat adsorpsi uap air yang eksotermik. Karakteristik ini juga didukung oleh luas permukaan spesifik dan volume pori *silica gel* yang tinggi berdasarkan hasil uji BET (Yeboah dan Darkwa, 2021). Selain itu, Hanif et al. (2023) menunjukkan bahwa meskipun *silica gel* RD memiliki kapasitas kesetimbangan hingga sekitar 0,38 kg/kg pada RH 60% dan suhu 27°C, kapasitas efektifnya tetap dibatasi oleh kinetika, difusi massa, dan efek termal selama proses adsorpsi. Efisiensi dehumidifikasi sebesar 85% menunjukkan bahwa *silica gel* memiliki performa yang sangat baik dalam sistem dehumidifikasi berbasis *solid desiccant*.

Pengembangan material komposit juga menunjukkan peningkatan performa dibandingkan material tunggal. Behede, Chakrabarti, dan Wankhede (2024) melaporkan bahwa komposit *silica gel*-CaCl₂ meningkatkan *moisture removal capacity* dan *dehumidification coefficient of performance*. Rambhad et al. (2023) menemukan bahwa kombinasi *silica gel*-LiCl *molecular sieve* 5A menghasilkan laju adsorpsi yang lebih tinggi, sedangkan *synthesized metal silicate* menunjukkan performa yang lebih baik pada konfigurasi regenerasi resirkulasi (Su et al., 2024).

Selain itu, *dual desiccant coated heat exchanger* mampu meningkatkan *dehumidification coefficient of performance* hingga 0,41 (Liu et al., 2024), sehingga pemilihan material menjadi faktor strategis dalam perancangan sistem.

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.

Meskipun berbagai penelitian telah mengevaluasi pengaruh parameter operasi dan material secara komprehensif, sebagian besar studi masih mempertahankan desain fisik rotor dalam kondisi tetap sehingga pengaruh desain geometris dan konfigurasi *test bed* belum dianalisis secara terintegrasi. Hal ini ditegaskan oleh 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 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.

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 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.

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

Keterangan :

r : 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)

2. Massa *dessicant*

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*) ($\frac{kg}{m^3}$)

3. 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 :

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

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

A_{ads} : Luas permukaan *ducting* sisi adsorpsi (m²)

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 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)

$\dot{V}_{ads}$: Debit pada sisi adsorpsi (m³/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 berikut.

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

Keterangan :

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

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

A_{reg} : Luas permukaan *ducting* sisi regenerasi (m²)

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 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} : Debit pada sisi regenerasi (m³/s)

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

7. 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.

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

Keterangan :

I_{total} : momen inersia total (kg m²)

α : percepatan sudut (rad/s²)

b. Momen inersia

Nilai momen inersia *wheel* dihitung dengan pendekatan silinder berongga karena bentuk *desiccant wheel* menyerupai cakram berongga. Menurut OpenStax (n.d.), momen inersia *wheel* dinyatakan sebagai berikut.

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

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

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

Keterangan :

I_{total} : Momen inersia total (kg m²)

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

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

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

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

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

$R_{i_{ring}}$: 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 dinyatakan sebagai berikut.

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

Keterangan :

α : percepatan sudut (rad/s^2)

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)

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 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 hidrolis 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)

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 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.

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

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

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

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

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

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)

K_o : 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.

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

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

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

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

$$\mu_{reg} = \mu_0 \left(\frac{T_{reg\ in}}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \times \left(\frac{T_0 + C}{T_{reg\ in} + C} \right) \quad (2.40)$$

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

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 hidrolis 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)

2.2.3 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 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 sebagai berikut.

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

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*

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* ($\frac{\text{kg}}{\text{s}}$)

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

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

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

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.

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

Keterangan :

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

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

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

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

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.

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

Keterangan :

ε_{deh} : Efektivitas dehumidifikasi (%)

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

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

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)

2.3 Material Desiccant White Silica Gel



Gambar 2.4 *White silica gel*
(Sumber: PT. Damases Sejahtera)

White silica gel merupakan material *desiccant* berbasis *silikon dioksida amorf* (SiO_2) yang banyak digunakan pada sistem *dehumidifier* karena memiliki kemampuan adsorpsi uap air yang tinggi, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4. Material ini berbentuk butiran kristal berwarna putih atau bening dengan kandungan SiO_2 mencapai sekitar 98%, bersifat non-toxic, tidak korosif, serta aman bagi lingkungan. Struktur pori mikro hingga meso yang dimiliki *silica gel* memberikan luas permukaan

yang sangat besar sehingga mampu menyerap dan menyimpan molekul air secara efektif melalui proses adsorpsi fisik. Menurut Hraiech (2025), *silica gel* memiliki luas permukaan spesifik sekitar 400–800 m²/g dengan kapasitas adsorpsi mencapai 25% dari massa keringnya pada kondisi 25°C dan RH 50%, serta dapat meningkat hingga sekitar 40% pada kondisi kelembapan yang lebih tinggi.

Kemampuan adsorpsi *silica gel* sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi sistem. Hasil penelitian Hraiech (2025), menunjukkan bahwa penggunaan *silica gel* pada sistem dehumidifikasi mampu menurunkan rasio kelembapan udara sebesar 0,005–0,011 kg air/kg udara kering dengan efisiensi penyerapan lebih dari 60%. Selain itu, penelitian Hasibuan dan Marbun (2018), menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan aliran udara dapat meningkatkan laju adsorpsi karena semakin banyak uap air yang bersentuhan dengan permukaan adsorben. Namun, peningkatan temperatur udara cenderung menurunkan kapasitas adsorpsi karena molekul air lebih mudah terlepas dari permukaan *silica gel*, sehingga pengendalian suhu dan laju aliran udara menjadi faktor penting dalam memperoleh performa dehumidifikasi yang optimal.

Selain memiliki kapasitas adsorpsi yang tinggi, *silica gel* juga mudah diregenerasi pada suhu relatif rendah, yaitu sekitar 50–120°C (Rambhad, 2023). Karakteristik ini memungkinkan penggunaan sumber panas berbiaya rendah seperti *heater* listrik, panas buang industri, maupun energi surya untuk proses regenerasi. Kombinasi sifat adsorpsi yang baik, stabilitas kimia yang tinggi, keamanan penggunaan, serta kemudahan regenerasi menjadikan *white silica gel* sebagai salah satu material *desiccant* yang paling banyak digunakan dalam sistem HVAC, *dehumidifier desiccant wheel*, penyimpanan produk elektronik, farmasi, makanan, dan berbagai aplikasi 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>	778 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)