

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustaka membahas landasan teori yang mendukung penelitian, meliputi konsep dasar *desiccant dehumidifier*, prinsip adsorpsi dan regenerasi, faktor-faktor yang memengaruhi kinerja sistem, karakteristik material *desiccant*, serta dasar perancangan *test bed* 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). 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).

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). 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. Perbedaan mekanisme ini menyebabkan variasi karakteristik performa dan kebutuhan energi, sehingga pemilihan sistem harus disesuaikan dengan kondisi operasi.



Gambar 2.1 Industrial *dehumidifier*
(Sumber: Kontraktor HVAC Team 2018)

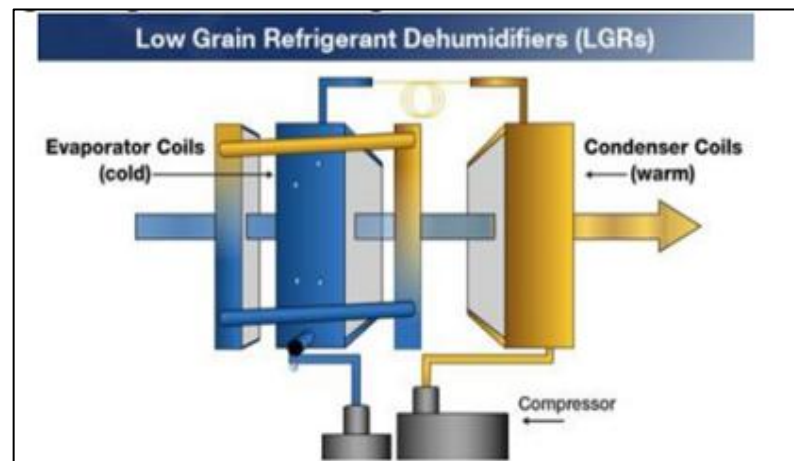
2.1.2 Jenis - jenis *dehumidifier* skala industri

Secara umum, *dehumidifier* industri terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu *dehumidifier* refrigerasi dan *dehumidifier desiccant*.

1. *Dehumidifier* refrigerasi

Dehumidifier refrigerasi yang ditampilkan pada Gambar 2.2 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).



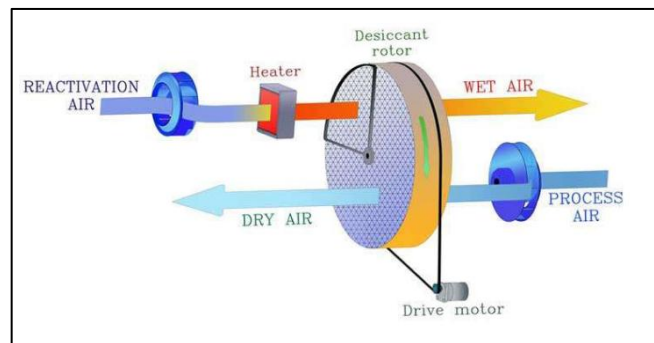
Gambar 2.2 Proses *refrigerant dehumidifier*
(Sumber: Kurniawan, Ruslani dan Anggriawan, 2017)

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).



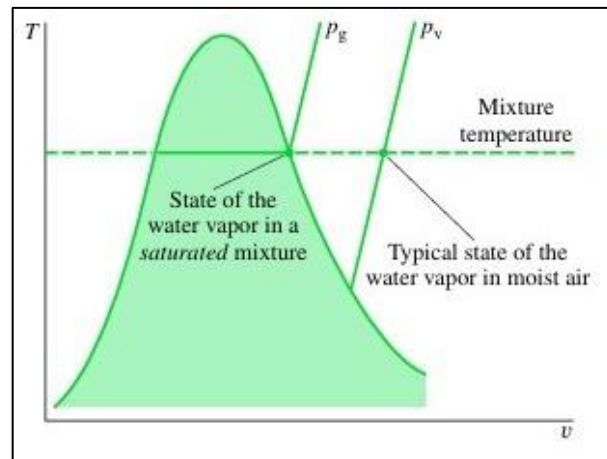
Gambar 2.3 Proses *desiccant dehumidifier*

(Sumber: Vision Air Quality Systems, n.d.)

2.1.3 Kelembapan relatif dan diagram psikrometrik

Dalam proses dehumidifikasi, kelembapan relatif udara (*relative humidity*, RH) merupakan salah satu parameter utama yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat kandungan uap air di dalam udara. Menurut Kurniawan et al. (2017), *relative humidity* merupakan salah satu sifat termodinamika udara yang menyatakan perbandingan antara tekanan parsial uap air aktual dengan tekanan uap jenuh pada temperatur yang sama, yang dinyatakan dalam satuan persen. Nilai RH dipengaruhi oleh temperatur udara karena tekanan uap jenuh meningkat seiring bertambahnya

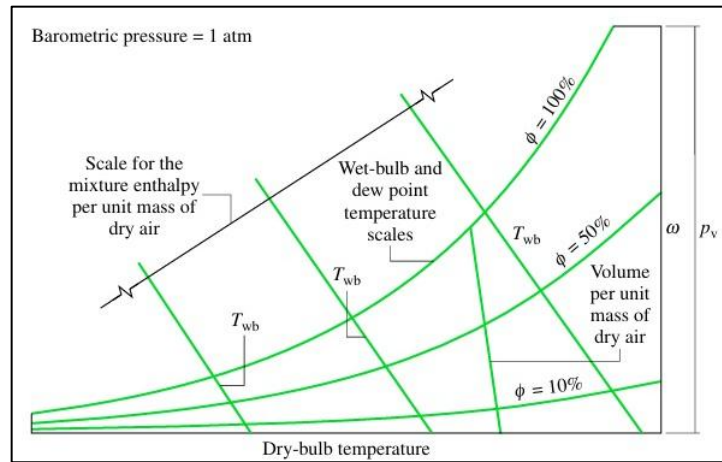
temperatur. Oleh sebab itu, ketika temperatur udara meningkat sementara kandungan uap air aktual tetap, tekanan uap jenuh menjadi lebih besar sehingga nilai RH menurun meskipun jumlah uap air di dalam udara tidak mengalami perubahan yang signifikan.



Gambar 2.4 Diagram T-v uap air dalam campuran udara–uap air
(Sumber : Moran et al., 2006)

Pada Gambar 2.4 menunjukkan hubungan antara tekanan uap aktual dan tekanan uap jenuh pada campuran udara–uap air dalam diagram temperatur–volume spesifik (T-v). Pada gambar tersebut terlihat bahwa tekanan uap aktual (P_v) merupakan tekanan yang dihasilkan oleh uap air yang terkandung di dalam udara, sedangkan tekanan uap jenuh (P_g) merupakan tekanan maksimum yang dapat dicapai uap air pada temperatur tertentu. Selama tekanan uap aktual masih lebih kecil daripada tekanan uap jenuh, udara berada dalam kondisi belum jenuh sehingga masih mampu menampung tambahan uap air. Sebaliknya, ketika tekanan uap aktual telah mencapai tekanan uap jenuh, udara berada pada kondisi jenuh dan proses kondensasi mulai terjadi. Gambar 2.4 ini menunjukkan bahwa perubahan kelembapan relatif dipengaruhi oleh hubungan antara tekanan uap aktual dan tekanan uap jenuh, di mana tekanan uap jenuh akan

berubah mengikuti perubahan temperatur udara.



Gambar 2.5 Diagram psikrometrik perubahan temperatur terhadap kelembapan relatif

(Sumber : Moran et al., 2006)

Untuk memperjelas pengaruh perubahan temperatur terhadap kelembapan relatif, hubungan tersebut dapat diamati melalui diagram psikrometrik yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Pada diagram terlihat bahwa apabila udara dipanaskan tanpa terjadi perubahan kandungan uap air, kondisi udara akan bergerak ke arah kanan sepanjang sumbu temperatur bola kering (*dry-bulb temperature*, T_{db}) dengan *humidity ratio* (ω) yang tetap. Perpindahan kondisi tersebut menyebabkan titik kondisi udara melewati kurva kelembapan relatif (*relative humidity*, RH) yang semakin rendah. Hal ini menunjukkan bahwa kenaikan temperatur meningkatkan kemampuan udara untuk menampung uap air, sehingga nilai RH menurun meskipun jumlah uap air yang terkandung di dalam udara tidak berubah. Penurunan RH terjadi karena tekanan uap jenuh (P_g) meningkat seiring bertambahnya temperatur, sedangkan kandungan uap air aktual (P_v) tetap. Oleh karena itu, diagram psikrometrik dapat digunakan untuk menjelaskan bahwa perubahan temperatur bola kering (T_{db}) merupakan salah satu

faktor utama yang memengaruhi perubahan kelembapan relatif (RH) pada proses dehumidifikasi.

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* dipengaruhi oleh temperatur regenerasi, laju aliran udara adsorpsi dan regenerasi. 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. (2025) menunjukkan bahwa variasi temperatur regenerasi 40–70°C mampu meningkatkan performa sistem dehumidifikasi berbasis polimer secara signifikan.

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* CaCl_2 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* (DCOP) 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 dengan persamaan 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*

Menurut Nuryanto (n.d.), *Spoke* memiliki bentuk yang dapat didekati sebagai balok, sehingga perhitungan volumenya menggunakan persamaan volume balok.

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

Keterangan :

t : Tinggi *spoke* (m)

l : Panjang *spoke* (m)

b : Tebal *wheel* (m)

2. Massa *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:

V_{wheel} : Volume *wheel* (m³)

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

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

3. Laju aliran volume adsorpsi

Laju aliran volume adsorpsi ($\dot{V}_{ads}$) merupakan volume udara lembap yang mengalir melalui sisi adsorpsi *desiccant* per satuan waktu. Menurut Alvindocs (2025), laju aliran volume adsorpsi dapat dihitung berdasarkan hubungan antara kecepatan aliran dan luas permukaan *ducting*.

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

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*.

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

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 regenerasi

Laju aliran volume regenerasi merupakan volume udara panas yang mengalir

melalui sisi regenerasi *desiccant* per satuan waktu. Menurut Alvindocs (2025), laju aliran volume regenerasi dapat dihitung berdasarkan hasil perkalian antara kecepatan aliran udara dan luas penampang *ducting* sisi regenerasi.

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

Keterangan:

$\dot{V}_{\text{reg}}$: 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 ($\dot{m}_{\text{reg}}$) 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*.

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

Keterangan:

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

$\dot{V}_{\text{reg}}$: Debit pada sisi regenerasi (m³/s)

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

7. Daya *wheel*

Menurut Engineering ToolBox (n.d), daya motor yang dibutuhkan untuk memutar *desiccant wheel* ditentukan berdasarkan torsi yang diperlukan dan kecepatan sudut

wheel selama operasi.

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

Keterangan :

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

τ : Torsi (Nm)

θ_2 : Kecepatan sudut (rad/s)

Untuk melengkapi perhitungan daya *wheel*, adapun persamaan-persamaan yang dapat digunakan sebagai berikut.

a. Torsi

Menurut LibreTexts (n.d.), torsi tersebut dihitung berdasarkan momen inersia *wheel* dan percepatan sudut yang dihasilkan selama proses percepatan awal.

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

Keterangan :

I_{wheel} : Inersia *wheel* (kg m²)

α : Percepatan sudut (rad/s²)

Adapun persamaan-persamaan yang digunakan untuk melengkapi perhitungan daya motor listrik sebagai berikut.

b. Momen inersia

Nilai momen inersia dibagi menjadi dua, yaitu inersia *wheel* dan inersia *desiccant*. Menurut Quipper (2019), momen inersia *wheel* dinyatakan sebagai berikut.

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

Keterangan:

I_{wheel} : Inersia *wheel* (kg m²)

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

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

$R_{i_{ring}}$: Jari-jari dalam *ring* (m)

Sedangkan, untuk momen inersia *desiccant* dinyatakan sebagai berikut.

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

Keterangan:

$I_{desiccant}$: Inersia *desiccant* (kg m²)

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

$R_{i_{ring}}$: Jari – jari dalam *ring* (m)

c. Percepatan sudut

Menurut LibreTexts (n.d.), percepatan sudut *wheel* diperoleh dari perubahan kecepatan sudut terhadap waktu percepatan.

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

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.

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

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.

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

Keterangan:

n : kecepatan putaran (rpm)

t : waktu dalam 1 putaran (s)

8. Daya *blower* adsorpsi

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

$$W_{blow_{ads}} = \dot{V}_{ads} \times \frac{\Delta Pa_{ads}}{\epsilon_{ads}} \quad (2.17)$$

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 (%)

Untuk melengkapi perhitungan daya *blower* adsorpsi, dapat menggunakan persamaan-persamaan sebagai berikut.

a. Total *pressure drop* proses adsorpsi

Total *pressure drop* merupakan akumulasi dari penurunan tekanan pada *ducting* dan *desiccant wheel*.

$$\Delta Pa_{ads} = Pa_{duct_{ads}} + Pa_{wheel_{ads}} \quad (2.18)$$

Keterangan:

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

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

b. *Pressure drop* pada *ducting*

Menurut Engineering ToolBox (n.d), penurunan tekanan pada *ducting* ditentukan berdasarkan nilai *friction loss* yang diperoleh dari diagram *Air Duct Friction Loss* dan panjang *ducting* yang digunakan.

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

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.

$$Pa_{wheel_{ads}} = \frac{2f \times \rho_{ads} \times v_{ads}^2 \times b}{Dh_{ads}} + \frac{Ko \times \rho_{ads} \times v_{ads}^2}{2} \quad (2.20)$$

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

$$Re = \frac{\rho_{ads} \times v_{ads} \times Dh_{ads}}{\mu_{ads}} \quad (2.22)$$

$$Dh_{ads} = \frac{4A_{ads}}{P_{ads}} \quad (2.23)$$

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

$$P_{ads} = \pi r \quad (2.25)$$

$$\mu_{ads} = \mu_o \left(\frac{T_{ads\ in}}{T_o} \right)^{\frac{3}{2}} \times \left(\frac{T_o + C}{T_{ads\ in} + C} \right) \quad (2.26)$$

Keterangan :

f : Faktor gesekan

ρ_{ads} : Massa jenis udara (kg/m³)

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

- b : Tebal *desiccant wheel* (m)
 $D_{h_{ads}}$: Diameter hidrolis saluran adsorpsi (m)
 K_o : Koefisien kehilangan tekanan lokal
 Re : Bilangan Reynolds
 μ_{ads} : Viskositas dinamis udara adsorpsi (Pa·s)
 A_{ads} : Luas penampang aliran sisi adsorpsi (m²)
 P_{ads} : Keliling basah adsorpsi (m)
 r : Jari-jari penampang (m)
 μ_o : Viskositas referensi udara (Pa·s)
 $T_{ads\ in}$: Temperatur udara *inlet* adsorpsi (K)
 T_o : Temperatur referensi (K)
 C : Konstanta Sutherland (K)

9. Daya *blower* regenerasi

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

$$W_{blow_{reg}} = \dot{V}_{reg} \times \frac{\Delta P_{a_{reg}}}{\epsilon_{reg}} \quad (2.27)$$

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*.

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

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.

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

Keterangan :

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

L_{reg} : Panjang *ducting* regenerasi (m)

c. *Pressure drop* pada *wheel*

Menurut Yadav and Yadav (2014), *pressure drop* pada *wheel* regenerasi dihitung

menggunakan pendekatan yang sama dengan sisi adsorpsi.

$$Pa_{wheel_{reg}} = \frac{2f \times \rho_{reg} \times v_{reg}^2 \times b}{Dh_{reg}} + \frac{Ko \times \rho_{reg} \times v_{reg}^2}{2} \quad (2.30)$$

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

$$Re = \frac{\rho_{reg} \times v_{reg} \times Dh_{reg}}{\mu_{reg}} \quad (2.32)$$

$$Dh_{reg} = \frac{2cd}{c + d} \quad (2.33)$$

$$\mu_{reg} = \mu_o \left(\frac{T_{reg\ in}}{T_o} \right)^{\frac{3}{2}} \times \left(\frac{T_o + C}{T_{reg\ in} + C} \right) \quad (2.34)$$

Keterangan:

f : Faktor gesekan

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

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

b : Tebal *desiccant wheel* (m)

Dh_{reg} : Diameter hidrolis saluran regenerasi (m)

Ko : Koefisien kehilangan tekanan lokal

Re : Bilangan Reynolds

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

a : lebar saluran (m)

b : Tinggi saluran (m)

μ_0 : Viskositas referensi udara (Pa·s)

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

T_0 : Temperatur referensi (K)

C : Konstanta Sutherland (K)

d. Pressure drop pada heater

Menurut Ai, Mak and Cui (2023), aliran udara regenerasi juga mengalami hambatan saat melewati *heater* yang dapat dihitung sebagai berikut.

$$Pa_{heater} = \frac{f \times L_{heater} \times \rho_{reg} \times v_{reg}^2}{2 Dh_{reg}} + \frac{k \times \rho_{reg} \times v_{reg}^2}{2} \quad (2.35)$$

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (2.36)$$

$$Re = \frac{\rho_{reg} \times v_{reg} \times Dh_{reg}}{\mu_{reg}} \quad (2.37)$$

$$\mu_{reg} = \mu_0 \left(\frac{T_{reg\ in}}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \times \left(\frac{T_0 + C}{T_{reg\ in} + C} \right) \quad (2.38)$$

$$k = f \times N \quad (2.39)$$

Keterangan:

f : Faktor gesekan

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

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

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

$D_{h_{reg}}$: Diameter hidrolis saluran regenerasi (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*

$$D_{input} = \frac{Z_{input} \times p}{\pi} \quad (2.40)$$

Keterangan :

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

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

p : *Pitch timing belt* (mm)

b. Diameter sproket *output*

$$D_{output} = \frac{Z_{output} \times p}{\pi} \quad (2.41)$$

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.

$$L_{belt} = 2C_{sproket} + \frac{\pi}{2}(D_{output} + D_{input}) + \frac{(D_{output} - D_{input})^2}{4C_{sproket}} \quad (2.42)$$

Keterangan:

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

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

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

D_{output} : Diameter sproket *output* (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 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.

$$\Delta\omega_{\text{ads}} = \omega_{\text{ads,in}} - \omega_{\text{ads,out}} \quad (2.43)$$

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 (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).

$$\text{MRC} = \dot{m}_{\text{ads}} \times (\omega_{\text{ads,in}} - \omega_{\text{ads,out}}) \quad (2.44)$$

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

3. *Moisture Regeneration Rate (MRR)*

Menurut Mahere, 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.

$$MRR = \dot{m}_{reg} \times (\omega_{reg,out} - \omega_{reg,in}) \quad (2.45)$$

Keterangan:

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

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

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

$\omega_{reg,out}$: *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.

$$\varepsilon_{deh} = \frac{\omega_{ads,in} - \omega_{ads,out}}{\omega_{ads,in}} \times 100 \% \quad (2.46)$$

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.

$$W_{heater} = \dot{m}_{reg} \times C_p \times \Delta T_{heater} \quad (2.47)$$

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 sistem dehumidifikasi dalam menghilangkan uap air dibandingkan dengan energi yang digunakan selama proses regenerasi. Menurut Alam dan Hussain (2022), dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$DCOP = \frac{\dot{m}_{ads} \times \Delta h_{vs} \times (\omega_{ads,in} - \omega_{ads,out})}{\dot{m}_{reg} \times C_p \times \Delta T_{heater}} \quad (2.48)$$

Dimana untuk mencari Δh_{vs} kita menggunakan rumus

$$\begin{aligned} \Delta h_{vs} = & (-0,614342 \times 10^{-4}) \times T_{ads\ in}^3 + 0,0158927 \times 10^{-2} \times T_{ads\ in}^2 \\ & - 0,236418 \times 10 \times T_{ads\ in} + 0,250079 \times 10^4 \end{aligned} \quad (2.49)$$

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

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 (SEC)*

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*.

$$SEC = \frac{W_{heater} + W_{blower}}{MRC} \quad (2.50)$$

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*



Gambar 2.6 *Silica gel* biru
(sumber: Douyee, n.d.)

Material *desiccant* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6 *Silica gel* biru merupakan bahan utama yang digunakan dalam sistem *dehumidifier* untuk menyerap uap air dari udara sehingga kelembapan udara dapat diturunkan. *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). Struktur tersebut menyediakan banyak situs aktif yang memungkinkan molekul uap air teradsorpsi secara efektif melalui gaya fisik pada permukaan pori. Selain itu, *silica gel* biru dilengkapi indikator warna yang berubah dari biru menjadi merah muda saat jenuh, sehingga 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.

Adsorpsi uap air pada *silica gel* biru merupakan proses eksotermis dengan panas adsorpsi sekitar 40 - 42 kJ/mol (Hraiech, 2025). Oleh karena itu, temperatur *silica gel* umumnya meningkat selama proses dehumidifikasi. Ketika seluruh situs adsorpsi telah terisi, kemampuan *silica gel* untuk mengadsorpsi uap air akan menurun (jenuh). Untuk mengembalikan kapasitas adsorpsinya, *silica gel* harus diregenerasi dengan mengalirkan udara panas sehingga molekul air terlepas dari permukaan material. Salah satu keunggulan utama material ini adalah kemampuannya untuk diregenerasi pada suhu relatif rendah, yaitu sekitar 50 - 120 °C (Rambhad et al., 2023). Selain memiliki stabilitas kimia yang baik, tidak beracun, dan tahan terhadap kelembapan tinggi, *silica gel* biru juga dapat digunakan 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.

Berdasarkan karakteristik material *desiccant* yang telah dibahas, *silica gel* biru dipilih sebagai media adsorben pada penelitian ini karena memiliki kemampuan adsorpsi yang baik pada kondisi udara lembap, stabil terhadap proses regenerasi

berulang, serta mampu diregenerasi pada temperatur yang relatif rendah. Karakteristik tersebut sesuai dengan tujuan penelitian, yaitu mengembangkan *test bed dehumidifier* skala laboratorium yang memiliki konsumsi energi lebih rendah namun tetap mampu menghasilkan performa dehumidifikasi yang baik. Adapun spesifikasi dari *silica gel* biru dapat dilihat pada .

Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Spesifikasi material *desiccant silica gel* biru

Parameter	Nilai
Jenis <i>desiccant</i>	<i>Silica gel</i> biru
Kandungan SiO ₂	99%
Bentuk	<i>Beads</i> (butiran bulat)
Diameter <i>beads</i>	2 – 4 mm
pH	4 – 8
Kapasitas adsorpsi pada RH 20%	>8% dari massa <i>silica gel</i>
Kapasitas adsorpsi pada RH 50%	>20% dari massa <i>silica gel</i>
Kapasitas adsorpsi pada RH 90%	>30% dari massa <i>silica gel</i>

(Sumber: Douyee, n.d)

Berdasarkan Tabel 2.1, kapasitas adsorpsi *silica gel* meningkat seiring meningkatnya kelembapan relatif udara. Pada kondisi RH 20%, *silica gel* mampu mengadsorpsi air lebih dari 8% terhadap massa keringnya. Kapasitas tersebut meningkat menjadi lebih dari 20% pada RH 50% dan lebih dari 30% pada RH 90%. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kandungan uap air di udara, semakin besar jumlah air yang dapat diadsorpsi oleh *silica gel*.