

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 *State Of The Art*

Dimasa lampau, sebuah penelitian yang membahas tentang analisa pengeringan partikel menggunakan metode CFD-DEM telah dilakukan oleh Jeni Tri Hartanti pada tahun 2022. Salah satu tujuan dari penelitian tersebut adalah untuk memahami pengaruh kecepatan udara *inlet* terhadap perpindahan panas pada proses pengeringan partikel biji padi. Penelitian terhadap pengeringan partikel tersebut dilakukan dengan latar belakang permasalahan dalam pendistribusian bahan pangan di Indonesia.

Hasil yang didapatkan pada penelitian tersebut salah satunya adalah nilai perpindahan panas konveksi fluida-partikel mencapai lebih dari 0,09 J/s pada variasi kecepatan udara masuk 3 m/s dan temperature partikel diatas 321 °K. sehingga dapat disimpulkan bahwa kecepatan udara *inlet* mempengaruhi perpindahan panas pada proses pengeringan partikel.

Sebuah penelitian berjudul *numerical studies of mixing of ellipsoidal particles in a bladed mixer* yang dibuat oleh (Herman et al., 2022) meneliti tentang pencampuran partikel berbentuk ellipsoid dalam sebuah mixer berbilah menggunakan sebuah metode elemen diskrit. Pada penelitian kali ini menggunakan tiga bentuk partikel yaitu oblate, bulat, dan prolate. Hasil dari penelitian ini adalah partikel berbentuk oblate mempunyai kualitas pencampuran yang sangat buruk dibandingkan dengan bentuk yang lain, lalu partikel berbentuk bulat lebih cepat bercampur jika dibandingkan dengan prolate. Dari proses pencampuran partikel tersebut disimpulkan juga bahwa torsi dari pengaduk bilah memiliki peran yang cukup penting dalam proses pencampuran.

Penelitian yang telah dilakukan oleh (Syahrul et al., 2017) tentang pengaruh kecepatan udara dan massa gabah terhadap pengeringan gabah juga menjadi acuan dalam melakukan penelitian ini. Dimana pada peneltian tersebut didapatkan kesimpulan bahwasannya variasi kecepatan udara pada

proses pengeringan gabah sangatlah berpengaruh pada waktu pengeringan, semakin cepat udara yang masuk maka akan semakin cepat pula proses pengeringannya. Penelitian yang serupa juga dilakukan oleh (Alit & Susana, 2020) dimana pada penelitian tersebut menghasilkan kesimpulan bahwa dengan waktu 240 menit, kecepatan udara *inlet* sebesar 2 m/s menghasilkan kadar air pada jagung sebesar 3 %, sedangkan pada kecepatan 3 m/s kadar air yang didapatkan yaitu sebesar 2,5%

Lalu pada sebuah mixer pengaduk bilah tentu saja bilah pengaduk menjadi salah satu faktor yang menentukan dapat proses pengeringan. (Afrizal Tegar Oktianto, 2014) melakukan penelitian tentang efek pengeringan yang ditimbulkan dari sudut bilah. Dimana hasil yang didapatkan menyatakan bahwa sudut bilah dapat menjadi faktor dalam proses pengeringan, pada sudut 10° *moisture content* yang dihasilkan sebesar 6,8%, pada sudut 20° sebesar 7,6 %, dan pada sudut 30° dihasilkan sebesar 8 %.

Lalu sebuah penelitian yang dilakukan oleh (Mustofa, 2021) pada sebuah *rotary dryer* yang bertujuan untuk mengeringkan 10 kg padi dengan poros pengaduk menghasilkan sebuah kesimpulan. Kesimpulan tersebut adalah kadar air yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh putaran poros pengaduk. Pada variasi 10 rpm dengan suhu 55°C dihasilkan kadar air sebesar 14,9 %, sedangkan pada variasi 20 rpm dengan suhu yang sama dihasilkan kadar air sebesar 13,4 %

Berdasarkan referensi dari literature nasional maupun internasional yang sudah disebutkan sebelumnya sebagai acuan. Penelitian kali ini akan berfokus pada pengaruh putaran alat pengering pengaduk bilah dengan jumlah empat blade pada gerakan, perpindahan panas, dan pindahan massa partikel berbentuk prolate (padi) dengan tujuan untuk mencari rancangan alat pengering yang efektif untuk membantu petani dalam menurunkan harga produksi pada proses pengeringan padi.

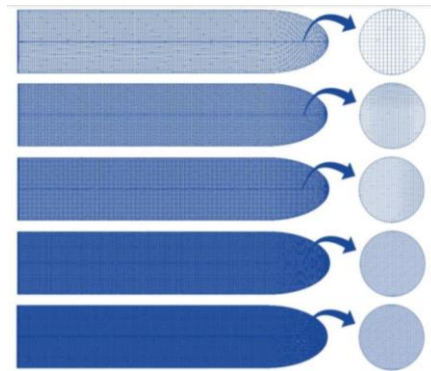
## 2.2 CFD (*Computational Fluid Dynamics*)

*Computational fluid dynamics* atau yang biasa disingkat dengan CFD adalah sebuah simulasi dengan berbasis computer (*numeric*) yang memiliki

banyak cangkupan contohnya yaitu perpindahan panas dan aliran fluida pada suatu sistem (Jalaluddin et al., 2020). Dari pemanfaatan CFD ini bisa didapatkan informasi tentang aliran fluida yang berjalan pada suatu sistem sehingga kita dapat menentukan langkah selanjutnya yang akan dilakukan pada fluida tersebut (Widiawaty et al., 2016)

Pengertian dari CFD menurut (Lomax et al., 2001) merupakan sebuah cara yang digunakan untuk mengetahui fenomena fisis yang terjadi pada suatu benda yang disimulasikan. Karena fenomena itu bersifat non-linear dan tidak memiliki solusi analitik maka CFD adalah pilihan yang tepat karena hasil yang dikeluarkan merupakan solusi numeris.

Menurut (Azzamudin & Effendy, 2017) metode CFD ini melakukan perhitungan secara komputasi pada tiap elemen pembagiannya dengan sebuah control dimensi, luas, dan volume. Singkatnya, sebuah benda uji coba berisikan fluida yang disimulasikan dengan CFD akan dilakukan perhitungan dengan cara dibagi menjadi beberapa bagian atau biasa disebut dengan *meshing*, sehingga bagian-bagian tersebut yang menjadi control pada perhitungan yang dilakukan.

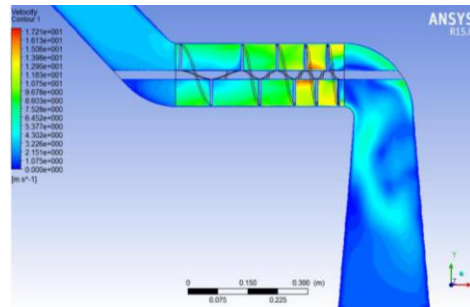


**Gambar 2.1** Contoh *Meshing* Pada Benda Uji

(Sumber: Ibrahim Ahmad Ibadurrohman, Nurkholis Hamid, 2021)

Perangkat lunak (*software*) CFD ini memiliki *output* berupa data-data, kurva, dan gambar yang merupakan prediksi yang akan terjadi pada benda uji tersebut. karena, *software* CFD ini dapat membuat sebuah prototype dalam bentuk virtual sesuai dengan kondisi dan bentuk alat yang ingin dilakukan proses simulasi. Ketepatan dari data-data yang didapatkan tersebut dibentuk

oleh seberapa banyak jumlah sel di dalam grid. Semakin kecil jumlah sel di dalam grid maka ketelitian hasil pemecahan semakin buruk begitupun sebaliknya (TRI HARTANTI, 2022).



**Gambar 2.2** Hasil Penggunaan CFD

(Sumber: Luthfie, 2017)

Menurut (IRAWAN, 2017) di zaman sekarang penggunaan aplikasi CFD sudah sangat banyak diterapkan kepada proses pembuatan desain mesin, ruang pembakaran, dan gas turbin. Karena, aplikasi CFD ini menganalisis aliran fluida, reaksi kimia, dan perpindahan panas menggunakan simulasi computer. Sebenarnya aplikasi CFD ini mengganti persamaan differensial parsial dari energy, momentum dan kontinuitas menjadi sebuah persamaan aljabar karena persamaan yang dimiliki fluida dianalisis berdasarkan persamaan differensial parsial

Hasil analisa dari penggunaan aplikasi CFD ini dapat dibagi menjadi 2 jenis yaitu berupa prediksi kualitatif maupun prediksi kuantitatif. Hasil analisa CFD tersebut tergantung dari data-data yang diinput serta persoalan yang digunakan. Tentunya dalam penggunaan CFD ini akan mendapatkan beberapa keuntungan seperti sebagai berikut:

1. Dapat memprediksi secara menyeluruh (*Foresight*)

CFD adalah sebuah aplikasi yang dibuat dengan tujuan dapat memprediksi hal-hal yang akan terjadi pada benda uji secara menyeluruh dan, karena dapat memprediksi banyak hal secara menyeluruh sehingga dapat segera menentukan desain secara optimal.

2. Mendapatkan pemahaman lebih dalam (*Insight*)

Beberapa alat uji sulit untuk dibuat prototipenya sehingga tidak adanya hasil pengujian yang didapatkan. CFD mampu mendesain sistem atau

alat uji tersebut secara virtual sehingga dapat dilakukan pengujian secara komputasi sehingga didapatkan data-data yang diinginkan

3. Lebih efisiensi dari segi waktu dan biaya (*Efficiency*)

Salah satu keuntungan utama dari penggunaan aplikasi CFD adalah tidak memerlukan biaya yang besar serta memiliki efisiensi waktu yang sangat baik. CFD itu sendiri adalah aplikasi untuk memprediksi apa saja yang akan terjadi pada sebuah alat atau sistem. (TRI HARTANTI, 2022)

### 2.2.1. Proses Simulasi CFD

Dalam memakai aplikasi CFD terdapat tiga tahapan yang harus dilakukan dalam proses simulasi CFD yaitu sebagai berikut :

1. *Preprocessing*

*Preprocessing* adalah sebuah tahapan untuk memasukan data-data yang akan digunakan dalam simulasi CFD dimulai dari mendefinisikan domain serta menentukan kondisi batas. Pada tahapan ini dibuat pula sebuah model benda uji dalam paket CAD (*Computer aided design*), dan membuat *mesh* atau membagi ruangan yang akan dianalisa menjadi beberapa bagian. (Azzamudin & Effendy, 2017)

2. *Processing*

Menurut (Krisnanda et al., 2020) *processing* adalah tahapan penghitungan data input dengan persamaan yang terlibat sehingga mencapai nilai yang konvergen atau hingga menuju error terkecil.

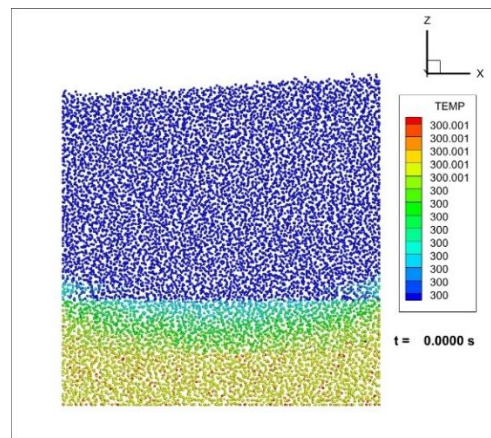
3. *Postprocessing*

*Postprocessing* adalah tahapan terakhir dalam proses simulasi CFD dimana perhitungan diinterpretasikan menjadi sebuah *output* gambar, grafik, hingga sebuah animasi dengan warna yang memiliki artinya masing-masing. Di zaman yang sudah modern ini proses *postprocessing* menjadi semakin baik lagi karna kemajuan *workstation* teknik yang memiliki kemampuan visualisasi grafik yang sangat baik. (INSYI, 2019)

### 2.3 DEM (*Discrete Element Method*)

*Discrete element method* atau yang biasa disingkat dengan DEM adalah sebuah simulasi menggunakan sebuah teknik komputasi computer yang memungkinkan untuk menganalisis tentang butiran pada suatu bahan pada jumlah banyak yang berinteraksi satu sama lain dengan peralatan dalam berbagai kondisi dan proses. Interaksi butiran yang dianalisis antara lain proses tumbukan, perpindahan panas, dan pemanfaatan energi. (Kurniawan & Kusnat, 2017)

Menurut (IRAWAN, 2017) informasi atau *output* yang akan diberikan dari penggunaan DEM ini adalah informasi yang dinamis yaitu kekuatan dan lintasan partikel. Model yang dimasukan pada DEM akan menghasilkan partikel yang sesuai oleh sifat mekanik serta fisik material yang diteliti berdasarkan *input* yang diberikan pada model.



**Gambar 2.3** Hasil Penggunaan DEM  
(Dokumen Pribadi)

### 2.4 Gabungan CFD-DEM

Simulasi dengan cara menggabungkan CFD-DEM (*Computational Fluid Dynamics-Discrete Element Methode*) ini adalah sebuah studi numerik yang dinilai efektif sebagai metode untuk mempelajari aliran antara fluida dan juga partikel. Metode CFD-DEM dinilai efektif karena dapat memberikan informasi tentang mekanisme aliran fluida dan partikel secara menyeluruh dan dapat dilihat dari segala arah serta dapat memberikan gambaran dari

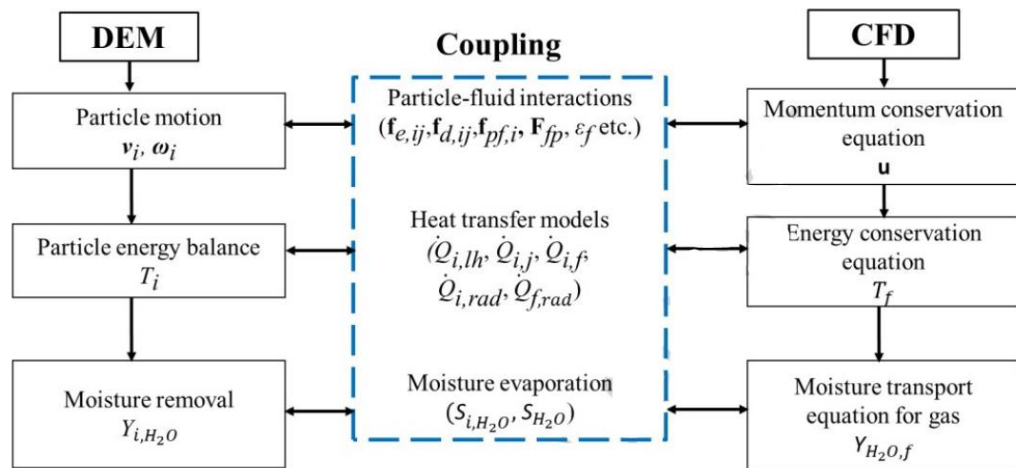
proses yang paling optimal sehingga mempermudah dalam pemahaman. (Zhu et al., 2007)

Dalam simulasi menggunakan CFD-DEM, aliran fluida diperlakukan sebagai fase kontinum lalu diselesaikan oleh persamaan Navier-Stokes pada skala sel komputasi dan gerakan partikel dimodelkan sebagai fase diskrit, dihitung dengan menggunakan hukum newton tentang gerak dalam skala partikel individual. *Output* dari permodelan diskrit dapat memberikan informasi yang dinamis, lalu dalam beberapa tahun terakhir penelitian tersebut telah berkembang pesat di seluruh dunia karena berkembang pula teknik DEM dan teknologi computer yang dimiliki di zaman ini. (Zhu et al., 2007)

Aliran dari sebuah butiran dalam ukuran partikel memiliki 2 jenis gerakan yaitu gerakan translasi dan rotasi. Pertukaran momentum dan energi pada aliran partikel didapatkan saat partikel berinteraksi dengan partikel yang berdekatan atau saat partikel berinteraksi dengan permukaan dan fluida disekitarnya. Menurut peneliti, bukan hanya torsi dan gaya yang mempengaruhi perpindahan partikel, akan tetapi juga dapat berasal dari hambatan perambatan gelombang partikel dan fluida yang lebih jauh (Xu & Yu, 1997).

Permodelan aliran solid pada aplikasi DEM berada pada level individual partikel, sedangkan aliran fluida pada aplikasi CFD berada pada level sel komputasi komputer. Gabungan antara CFD dan DEM dapat diartikan sebagai berikut (Xu & Yu, 1997), Informasi yang dimiliki oleh time step DEM antara lain posisi partikel dan kecepatan partikel, lalu kemudian dievaluasi porositas dan gaya drag fluida volumentrik dalam sel komputasi. Setelah itu CFD akan menggunakan data yang sudah didapatkan untuk menentukan dan menghitung medan aliran gas yang kemudian menghasilkan gaya drag fluida yang bekerja pada partikel. Gaya yang sudah didapatkan melalui CFD digabungkan dengan DEM akan menghasilkan sebuah informasi tentang gerak dari partikel. Meskipun berbeda-beda, penggabungan antara CFD dan DEM ini sudah dilakukan oleh banyak peneliti untuk menggabungkan dua fasa yang dimodelkan pada skala yang berbeda-beda.

Pada gambar 2.4 berikut ini dapat dilihat contoh penggabungan dari CFD-DEM (Wahyudi et al., 2013).



**Gambar 2.4** Penggabungan CFD-DEM

(Azmir et al., 2018)

## 2.5 Definisi Pengeringan

Pengertian dari pengeringan adalah sebuah teknik atau cara agar dapat menurunkan kadar air yang dimiliki oleh suatu bahan sampai batas tertentu. Tujuan dari mengurangi kadar air yang dimiliki oleh bahan makanan agar dapat memperlambat laju kerusakan dari pengaruh biologis dan kimia. Proses pengeringan dilakukan dengan cara mengalirkan udara panas pada bahan untuk menurunkan kelembaban udara. Karena kelembaban udara sudah menurun menyebabkan tekanan uap air dari bahan lebih besar daripada tekanan uap air di udara sehingga uap air dari bahan akan mengalir ke udara. (Rimadhani, 2022)

Pengertian dari pengeringan menurut (SHIDIQ, 2022) adalah proses pemindahan panas dan uap air yang dilakukan secara bersamaan yang dilakukan dalam sebuah media pengering. Terdapat dua fenomena penting dalam pengeringan yaitu air harus dikeluarkan dari dalam bahan dan panas harus diberikan pada bahan yang akan dikeringkan.





**Gambar 2.5** Pengeringan

(Sumber: SHIDIQ, 2022)

Selain bertujuan untuk mencegah terjadinya kerusakan pada bahan pangan saat disimpan, pengeringan juga dilakukan dengan tujuan untuk menurunkan biaya, mempermudah proses pengemasan, dan mempermudah proses pengangkutan. Terdapat beberapa faktor penting pada bahan yang mempengaruhi dalam proses pengeringan antara lain yaitu ukuran bahan, kadar air yang dimiliki, perbedaan suhu dan udara sekitar, kelembaban dan tekanan udara. Setelah dilakukan proses pengeringan akan terjadi beberapa perubahan pada bahan yaitu perubahan warna, aroma, dan tekstur yang dimiliki oleh bahan pangan seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.6 dibawah



**Gambar 2.6** Dampak Pengeringan Pada Bahan Makanan

(Sumber: [www.diadona.id](http://www.diadona.id))

## 2.6 Jenis-jenis Pengeringan

Proses pengeringan dibagi menjadi dua jenis yaitu jenis pengeringan alami dan pengeringan buatan berikut penjelasannya

### 1. Pengeringan alami

Menurut (Rimadhani, 2022) proses pengeringan alami dilakukan secara langsung dengan sumber panas yang berasal dari radiasi matahari, aliran udara panas, dan kelembaban atau bisa disebut dengan penjemuran. Sarana yang paling umum digunakan dalam pengeringan alami ini yaitu lantai semen, jalan beraspal, atau sebuah tikar seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.7 dibawah.



**Gambar 2.7** Pengeringan Alami

(Sumber: [www.diadona.id](http://www.diadona.id))

Sampai saat ini pengeringan jenis ini masih banyak ditemukan di wilayah Indonesia karena beberapa keuntungan yang dimilikinya yaitu biaya yang dikeluarkan jauh lebih murah karena mengandalkan energi alam dan tidak membutuhkan bahan bakar, serta mudah dilakukan oleh orang yang baru pertama kali melakukan proses pengeringan. Namun, ada keuntungan pasti ada kerugian yang dimiliki oleh jenis pengeringan alami ini yaitu suhu pengeringan yang dikeluarkan oleh matahari tidak dapat dikontrol dan sangat bergantung pada cuaca sehingga proses pengeringan dapat berlangsung lebih lama, dan juga memerlukan lahan yang luas untuk dapat melakukan penjemuran. (Hartuti & Sinaga, 1997)

## 2. Pengeringan buatan

Pengeringan dengan menggunakan pemanasan dari hasil pembakaran adalah definisi dari pengeringan buatan. Dimana pengeringan buatan ini adalah lawan dari pengeringan alami, dimana pengeringan alami tidak menggunakan bahan bakar namun pada pengeringan buatan ini menggunakan bahan bakar contoh dari pengering buatan dapat dilihat pada gambar 2.8 dibawah

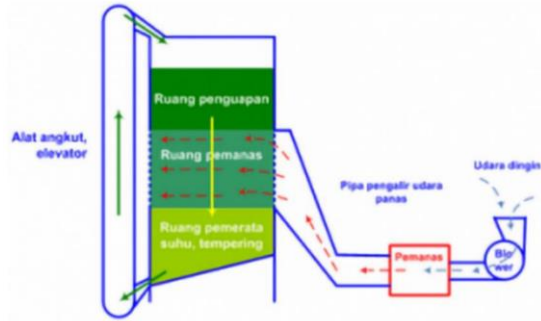


**Gambar 2.8** Pengeringan Buatan  
(Sumber: [www.metromesin.id](http://www.metromesin.id))

Tentu saja pengering buatan memiliki kelebihan serta kekurangannya. Kelebihannya yaitu panas yang dihasilkan merata dan jauh lebih stabil jika dibandingkan dengan panas matahari yang tidak bisa diatur suhunya sehingga proses pengeringan dapat dilakukan dengan waktu lebih singkat, lalu yang kedua tidak bergantung dengan cuaca maupun siang-malam sehingga dapat dilakukan setiap saat. Namun kekurangan yang dimiliki dari pengering buatan ini adalah biaya yang dikeluarkannya tentu jauh lebih mahal baik dari segi pembuatan media pengeringnya sama dengan biaya operasionalnya. (Hartuti & Sinaga, 1997)

Menurut (Rimadhani, 2022) pengeringan buatan dibagi menjadi dua jenis yaitu pengering sistem kontinyu dan pengering sistem *batch*. Pada pengeringan sistem kontinyu, kontak bahan dengan udara pengering hanya terjadi satu kali saat bahan berada pada zona

pengeringan dan juga bahan mengalir secara kontinyu (gambar 2.9). Lalu untuk pengering sistem *batch* bahan akan dikeringkan dalam suatu wadah dengan udara pengering dan dilakukan secara berulang kali (gambar 2.10)



**Gambar 2.9** Pengering Sistem Kontinyu

(Sumber: Rimadhani, 2022)



**Gambar 2.10** Pengering Sistem *Batch*

(Sumber: Rimadhani, 2022)

## 2.7 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Pengeringan

terdapat faktor-faktor yang mempengaruhi proses pengeringan yang dilakukan pada sebuah alat pengering. Faktor-faktor tersebut adalah sebagai berikut ini:

### 1. Luas Penampang Alat

Jika sebuah alat pengeringan memiliki luas penampang yang lebih besar maka pengeringan akan semakin lebih cepat. Hal tersebut dapat terjadi karena semakin besarnya kontak antara bahan pangan dengan udara panas begitupun sebaliknya.

### 2. Tekanan Udara Pada Alat

Semakin kecil tekanan udara yang dimiliki pada alat maka uap air dapat lebih banyak tertampung dan disingkirkan dari bahan karena udara yang terdapat pada tekanan rendah memiliki kerapatan yang kurang. Begitupun sebaliknya, jika tekanan udara lebih besar maka proses pengeringan akan lebih lambat karena lembab.

### 3. Perbedaan suhu

Prinsip dari pengeringan itu sendiri adalah saat suhu pada medium pemanas dan bahan pangan memiliki beda suhu yang besar maka kandungan air akan keluar lebih cepat sehingga proses pengeringanpun menjadi lebih cepat juga. Namun, jika tidak sesuai dengan bahan yang akan dikeringkan maka akan terjadi *case hardening* atau bagian luar sudah kering sedangkan bagian dalam belum. Oleh karena hal itu perbedaan suhu menjadi faktor penting dalam proses pengeringan bahan.

## 2.8 Flat Bed Dryer (FBD) dan Prinsip Kerjanya

*flat bed dryer* adalah sebuah alat pengering yang biasa digunakan untuk mengeringkan gilingan beras dan merupakan pengering bak statis yang paling sederhana. Keuntungan yang didapatkan dari penggunaan alat pengering ini adalah memiliki waktu pengeringan yang singkat karena FBD merupakan pengering buatan, memiliki kapasitas yang besar, dan mudah di kontrol (SHIDIQ, 2022).

Menurut (Suhelmi et al., 2022) prinsip kerja dari alat pengering FBD ini yaitu udara panas yang dihasilkan oleh pemanas akan didorong oleh blower secara paksa sehingga aliran udara tersebut akan menuju ke bahan pangan yang akan dilakukan proses pengeringan, sistem kerja ini biasa disebut dengan *forced convection*

*Flat bed dryer* ini memiliki lima buah komponen penting di dalamnya yaitu bak pengering (*box dryer*) yang biasanya berbentuk persegi panjang dan terdapat alas berlubang dibawahnya yang berfungsi sebagai jalur udara panas masuk. Yang kedua ada ruang *plenum* untuk menampung dan juga meneruskan udara panas yang didorong blower menuju bak pengeringan.

Blower berfungsi untuk mendorong atau meneruskan udara panas menuju bak pengeringan. Selanjutnya ada sumber pemanas yang biasanya menggunakan kompor gas. Dan yang terakhir ada motor penggerak. Pada gambar 2.11 dibawah dapat dilihat contoh dari *flat bed dryer* (SHIDIQ, 2022).



**Gambar 2.11** *Flat Bed Dryer*

(Sumber: [www.agriculture.com.ph](http://www.agriculture.com.ph))

## 2.9 Permodelan CFD-DEM pada *Flat Bed Dryer*

Pada permodelan CFD-DEM yang diterapkan pada *flat bed dryer* ini, fase padat diperlakukan sebagai fase diskrit sedangkan untuk perilaku alirannya dapat dijelaskan dengan metode elemen diskrit. Lalu untuk gerakan translasi dan rotasi pada partikel dapat dijelaskan dengan hukum gerak newton dalam persamaan berikut:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \mathbf{f}_{p-f,i} + \sum_{j=1}^{k_i} (\mathbf{f}_{c,ij} + \mathbf{f}_{d,ij}) + m_i \mathbf{g} - \dot{m}_{v,i} (\mathbf{u} - \mathbf{v}_i) \dots\dots\dots(2.1)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} (\mathbf{T}_{ij} + \mathbf{M}_{ij} + \mathbf{T}_{n,ij}) \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana  $m_i$  adalah massa,  $I_i$  yaitu momen inersia,  $\mathbf{v}_i$  kecepatan translasi, dan  $\omega_i$  adalah rotasi partikel  $i$  lalu selanjutnya kecepatan gas disimbolkan dengan  $\mathbf{u}$ . terdapat beberapa gaya yang bekerja pada padatan dengan simbolnya masing masing yaitu gaya interaksi gas padat ( $\mathbf{f}_{p-f,i}$ ), gaya antar partikel pada partikel  $i$  dan  $j$ , yang terdiri dari gaya kontak ( $\mathbf{f}_{c,ij}$ ), dan gaya rendaman viskositas ( $\mathbf{f}_{d,ij}$ ), gaya gravitasi ( $m_i \mathbf{g}$ ), torsi  $\mathbf{T}_{ij}$  dihasilkan oleh gaya tangensial, Torsi gesekan *rolling* ( $\mathbf{M}_{ij}$ ) dan torsi normal ( $\mathbf{T}_{n,ij}$ ). Pada persamaan 2.1 menyatakan tentang partikel yang kehilangan momentum

akibat penguapan uap air. Lalu untuk konservasi massa dan momentum untuk fase fluida dinyatakan dengan: (Wahyudi et al., 2022)

$$\frac{\partial(\rho_f \epsilon_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \epsilon_f \mathbf{u}) = \sum_{i=1}^k \dot{m}_{v,i} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\frac{\partial(\rho_f \epsilon_f \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \epsilon_f \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla P - \mathbf{F}_{p-f} + \nabla \cdot (\epsilon_f \boldsymbol{\tau}) + \rho_f \epsilon_f \mathbf{g} + \sum_{i=1}^k \dot{m}_{v,i} (\mathbf{u} - \mathbf{v}_i) \dots\dots\dots (2.4)$$

Porositas dilambangkan dengan ( $\epsilon$ ), tensor tegangan kental fluida ( $\tau$ ), densitas fluida ( $\rho_f$ ), tekanan (P), laju penguapan uap air partikel  $i$  ( $\dot{m}_{v,i}$ ), dan gaya interaksi partikel-fluida volumentrik ( $\mathbf{F}_{p-f}$ ). gaya interaksi partikel-fluida itu sendiri didapatkan dari persamaan berikut

$$\mathbf{F}_{p-f} = \frac{1}{V_{cell}} \sum_{i=1}^k \mathbf{f}_{p-f,i} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana ( $\mathbf{F}_{p-f}$ ) adalah gaya fluida pada partikel  $i$  sedangkan  $k$  yaitu jumlah partikel dalam sel komputasi.

Terdapat dua mekanisme pertukaran panas yang terjadi pada partikel  $i$  dan sekelilingnya. Pertama adalah partikel kehilangan panas akibat penguapan uap air, dan yang kedua konveksi partikel-fluida. Oleh karena itu, berikut persamaan keseimbangan fasa padat pada skala partikel:

$$m_i c_{p,i} \frac{dT_i}{dt} = \dot{Q}_{f,i} - \dot{m}_{v,i} h_{fg}^* \dots\dots\dots (2.6)$$

Temperature partikel  $i$  pada waktu  $t$  ( $T_i$ ), panas spesifik ( $c_{p,i}$ ), dan laju pertukaran panas konvektif antara fluida dengan partikel  $i$  ( $\dot{Q}_{f,i}$ ). pada model *bladed mixer*, fenomena perpindahan panas antara partikel dengan dinding partikel diabaikan karena dalam fluidized bed. Lalu, durasi kontak dan juga area kontak untuk permukaan kurva sangatlah kecil. (Wahyudi et al., 2022)

Pada model *flat bed dryer* untuk suhu rendah perpindahan panas jenis radiasi dapat diabaikan sehingga tidak dipertimbangkan dalam model. Suku terakhir pada persamaan 2.6 menjelaskan tentang kehilangan panas dari sebuah partikel atau entalpi akibat penguapan air. Panas laten penguapan air dari partikel ( $h_{fg}^*$ ) merupakan fungsi dari kadar air dalam partikel dan suhu partikel. Lalu persamaan panas laten dinyatakan sebagai berikut: (Wahyudi et al., 2022)

$$h_{fg}^* = h_{fg}(T_i)(1 + p \exp(qM)) \dots\dots\dots (2.7)$$

Pada persamaan 2.7 diatas,  $M$  adalah kadar air di dalam basis kering lalu konstanta  $p$  dan  $q$  bergantung kepada jenis partikel yang akan digunakan. Sebagai contoh, jika untuk partikel beras  $p = 3,2$  dan  $q = -21,7$  panas laten penguapan air dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$h_{fg} = 1918,46 \left( \frac{T_p}{(T_p - 33,91)} \right)^2 \dots\dots\dots (2.8)$$

Lalu untuk persamaan energi fase fluida dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{\partial(\rho_f \epsilon_f c_{p,f} T_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \epsilon_f \mathbf{u} c_{p,f} T_f) = \nabla \cdot \{ \epsilon_f (k_{f,eff}) \nabla T_f \} - \frac{1}{V_{cell}} \sum_{i=1}^k \dot{Q}_{f,i} + \frac{1}{V_{cell}} \sum_{i=1}^k \dot{m}_{v,i} h_{fg}^* \dots\dots\dots (2.9)$$

Pada persamaan 2.9 diatas,  $c_{p,f}$  adalah panas spesifik, lalu untuk  $T_f$  yaitu temperature fluida pada waktu  $t$ , sedangkan  $k_{f,eff}$  adalah konduktivitas termal efektif pada fluida di dalam sel komputasi. Setelah itu, untuk persamaan perpindahan massa uap air dalam fase fluida dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{\partial(\rho_f \epsilon_f Y_{H2O})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \epsilon_f \mathbf{u} Y_{H2O}) = \nabla \cdot \{ \epsilon_f (D_{av}) \nabla Y_{H2O} \} + \frac{1}{V_{cell}} \sum_{i=1}^k \dot{m}_{v,i} \dots\dots\dots (2.10)$$

$Y_{H2O}$  adalah massa uap air dalam campuran gas sedangkan  $D_{av}$  adalah suhu yang berasal dari difusivitas termal uap air yang terdapat di udara yang dapat dinyatakan dengan:

$$D_{av} = 2.16 \times 10^{-5} \left( \frac{T}{273.15} \right)^{1.8} \dots\dots\dots (2.11)$$

## 2.10 Interaksi Partikel Fluida Pada *Flat Bed Dryer*

Menurut (Hilton et al., 2010) terdapat tiga buah gaya yang dominan pada partikel fluida yaitu gaya drag, gaya tekanan gradient, dan gaya kekentalan pada sistem terfluidasi. Pada sebuah bilangan Reynold yang kecil, gaya dari viskositas dapat diabaikan. Untuk partikel berbentuk ellipsoid jika orientasi dari partikel tidak berjalan searah dengan aliran, dan distribusi tekanan asimetris pada permukaan partikel maka akan menginduksi gaya angkat dan torsi pitching. Namun, gaya angkat serta torsi pitching tidak memiliki pengaruh yang besar terhadap koefisien perpindahan panas dan massa. Sehingga hanya gaya Tarik dan tekanan gradient yang diperhitungkan. (Zhou et al., 2011)

Sebuah fluida akan berinteraksi dengan partikel yang terdapat disekitarnya. Karena terjadinya tegangan geser fluida pada permukaan partikel tersebut maka akan menghasilkan beberapa gaya interaksi fluida-



partikel. Pengertian dari gaya interaksi fluida-partikel adalah sebuah gaya dorong untuk menggerakkan sebuah partikel sehingga gaya dorong ini harus diperhatikan dengan baik (TRI HARTANTI, 2022).

Menurut penelitian (Zhou et al., 2011) setelah dianalisis reliabilitas beberapa korelasi gaya drag yang telah dikemukakan oleh beberapa peneliti didapatkan kesimpulan bahwasannya korelasi gaya hambat milik seorang peneliti bernama (Hölzer & Sommerfeld, 2008) memiliki lebih banyak peminat dan disukai sehingga koefisien drag  $C_D$  yang digunakan yaitu sebagai berikut:

$$C_D = \frac{8}{Re_{p,i}} \frac{1}{\sqrt{\varphi_{||}}} + \frac{16}{Re_{p,i}} \frac{1}{\sqrt{\varphi}} + \frac{3}{\sqrt{Re_{p,i}}} \frac{1}{\varphi^{3/4}} + 0.4210^{0.4(-\log\varphi)^{0.2}} \frac{1}{\varphi_{\perp}} \dots\dots\dots (2.12)$$

Rasio antara luas penampang *sphere* ekuivalen volume dengan selisih antara setengah luas permukaan dan rata-rata luas penampang memanjang yang diproyeksikan dengan partikel ellipsoidal disimbolkan dengan  $\varphi_{||}$ . Sedangkan symbol  $\varphi_{\perp}$  adalah rasio antara luas penampang *sphere* ekuivalen volume dengan proyeksi luas penampang yang tegak lurus. Pertimbangan persamaan elips relative terhadap koordinat lokal dapat dinyatakan sebagai berikut: (Wahyudi et al., 2022)

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \dots\dots\dots (2.13)$$

Luas proyeksi partikel berbentuk ellipsoidal ( $A_p$ ) tegak lurus dengan aliran fluida dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$A_p = \pi a_1 b_1 e_{\nu} \cdot e_{\tau} \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana  $a_1$  dan  $b_1$  adalah sumbu mayor dan juga minor dari sebuah proyeksi elips dan dinyatakan sebagai berikut:

$$a_1 = (d \cos^2\psi + e \sin^2\psi + g \sin 2\psi)^{-0.5} \dots\dots\dots (2.15)$$

$$b_1 = (d \sin^2\psi + e \cos^2\psi - g \sin 2\psi)^{-0.5} \dots\dots\dots (2.16)$$

Lalu dengan persamaan berikut:

$$d = \frac{1}{a^2} \cos^2 \varphi \cos^2 \theta + \frac{1}{b^2} \sin^2 \varphi \cos^2 \theta - \frac{1}{c^2} \sin^2 \theta$$

$$e = \frac{1}{a^2} \sin^2 \varphi + \frac{1}{b^2} \cos^2 \varphi$$

$$g = 0.5 \left( -\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) \sin 2 \varphi \cos \theta$$

$$\tan 2\varphi = \frac{-2g}{e-d}$$

$$\cos\theta = \frac{\cos\gamma_v}{K_\tau C^2}$$

$$\cos\varphi = \frac{\frac{\cos\alpha_v}{a^2}}{\left(\frac{\cos^2\alpha_v}{a^4} + \frac{\cos^2\beta_v}{b^4}\right)^{0.5}}$$

$$K_\tau = \left(\frac{\cos^2\alpha_v}{a^4} + \frac{\cos^2\beta_v}{b^4} + \frac{\cos^2\gamma_v}{c^4}\right)^{0.5} \dots\dots\dots(2.17)$$

Sudut antara sumbu utama yang bersesuaian (yaitu a, b, dan c) adalah pengertian dari symbol  $\alpha_v, \beta_v$  dan  $\gamma_v$ . Lalu untuk  $e_v$  adalah sebuah vector satuan kecepatan fluida pada pusat partikel berbentuk ellipsoidal, dan  $e_\tau$  adalah sebuah vector satuan yang penjabarannya yaitu sebagai berikut:

$$e_\tau = \frac{1}{K_\tau} \left(\frac{\cos\alpha_v}{a^2}, \frac{\cos\beta_v}{b^2}, \frac{\cos\gamma_v}{c^2}\right) \dots\dots\dots(2.18)$$

Dari asumsi sistem lumped pada persamaan 2.6, persamaan matematis untuk pertukaran panas fluida-partikel ( $\dot{Q}_{f,i}$ ) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\dot{Q}_{f,i} = Nu \frac{k_f}{D_e} A_e [T_f - T_i] \dots\dots\dots(2.19)$$

Pada persamaan 2.19 diatas,  $A_e$  adalah luas permukaan bola yang setara dengan volume sementara  $k_f$  adalah temperature dari konduktivitas termal fluida yang sudah dievaluasi dengan temperature rata rata partikel fluida.

$$Nu = 1.76 + 0.55\varphi Re_{p,i}^{0.5} Pr^{0.333} \varphi^{0.075} + 0.014 Re^{0.67} Pr^{0.333} \left(\frac{\varphi}{\varphi_\perp}\right)^{7.2} \dots\dots(2.20)$$

Untuk menyelesaikan persamaan 2.20 diatas adalah dengan mengembangkan korelasi bilangan nusselt untuk partikel berbentuk ellipsoidal. Karena, hal ini sangat bergantung pada perilaku aliran, orientasi partikel terhadap vector aliran fluida, dan sifat dari partikel itu sendiri. Hingga sekarang, sangat sedikit literatur yang membahas tentang korelasi bilangan nusselt tersebut.

Sama seperti korelasi nusselt untuk perpindahan panas antara fluida dan partikel ellipsoidal, literature yang membahas secara lengkap mengenai bilangan Sherwood juga belum ada hingga saat ini. Sehingga untuk mempermudah bentuk serta orientasi partikel diasumsikan tidak mempengaruhi dari laju penguapan air dari partikel. Sehingga, persamaan perpindahan massa konvektif secara umum yaitu sebagai berikut:

$$\dot{m}_{v,i} = \frac{sh^{D_{av}}}{D_e A_e} [\rho_{v,s} - \rho_{v,f}] \dots\dots\dots (2.21)$$

$$sh = (1.2 + 0.6Re_{p,i}^{0.5} Sc^{0.333}) \dots\dots\dots (2.22)$$

Dapat dilihat pada persamaan 2.21 diatas,  $\rho_{v,s}$  adalah densitas uap air yang terdapat pada permukaan partikel, lalu  $\rho_{v,f}$  yaitu densitas uap air pada sel komputasi. Lalu untuk  $D_{av}$  dapat dicari dengan persamaan 2.11 sebelumnya. Untuk persamaan 2.22 diatas, sesungguhnya dikembangkan unruk partikel dengan bentuk bola. Oleh karena itu untuk partikel ellipsoidal, laju perpindahan massanya mungkin akan berbeda dengan yang dihitung dari persamaan 2.22. namun, terdapat kesamaan antara proses perpindahan panas dan massa dalam proses pengeringannya. (Razin, 2001)

Terdapat korelasi antara koefisien perpindahan panas dengan koefisien perpindahan massa, semakin tinggi koefisien perpindahan panas maka semakin tinggi pula koefisien perpindahan massa. Sehingga untuk perkiraan dengan model *flat bed dryer* silinder persamaan 2.23 dibawah dapat digunakan:

$$\rho_{v,s} = Exp \left( \frac{-\Delta E_v}{RT_i} \right) \rho_{v,sat}(T_i) \dots\dots\dots (2.23)$$

Pada persamaan 2.23,  $E_v$  adalah energy aktivasi semu yang menjelaskan tingkat kesulitan untuk menghilangkan air dari sebuah bahan yang sudah dikeringkan pada tingkat kadar air yang rendah. Contoh, energi aktivasi untuk partikel padi dapat diturunkan dengan persamaan berikut:

$$\frac{\Delta E_v}{\Delta E_{v,e}} = f (M - M_e) = -125.37(M - M_e)^3 + 28.378(M - M_e)^2 - 4.486(M - M_e) + 1.008 \dots\dots\dots (2.24)$$

Dari persamaan 2.24 diatas,  $\Delta E_{v,e} = -RT_f \ln(RH)$ . RH itu sendiri adalah singkatan dari *relative humidity* (persamaan 2.25), lalu  $M_e$  adalah kadar air kesetimbangan yang ditentukan korelasi empiris tergantung dengan bahan yang akan dikeringkan. Contoh untuk partikel es  $M_e$  pada persamaan 2.26 berikut:

$$RH = \frac{P_v}{P_{v,sat}} \Big|_{T_f,p} = \frac{\rho_{v,f}}{\rho_{v,sat}} \Big|_{T_f,p} \dots\dots\dots (2.25)$$

$$M_e = \left( \frac{\ln(1-RH)}{-8.5014 \times 10^{-6} T_f} \right)^{\frac{1}{2.386}} \dots\dots\dots (2.26)$$

Kepadatan uap air jenuh ( $\rho_{v,sat}$ ) sangat bergantung pada suhu campuran gas dan nilainya ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\rho_{v,sat}(T_f) = 4.884 \times 10^{-9}(T_f - 273)^4 - 1.4807 \times 10^{-7}(T_f - 273)^3 + 2.6572 \times 10^{-5}(T_f - 273)^2 - 4.8613 \times 10^{-5}(T_f - 273) + 0.008342 \dots \dots \dots (2.27)$$