

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kopi

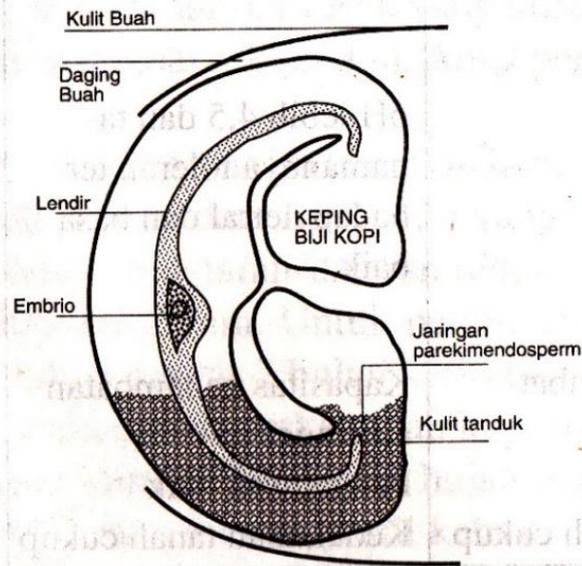
Tumbuhan kopi (*Coffea Sp.*) termasuk *familia Rubiaceae* yang dikenal mempunyai sekitar 500 jenis dengan tidak kurang dari 600 *species*. *Genus Coffea* merupakan salah satu genus penting dengan beberapa *species* yang mempunyai nilai ekonomi dan dikembangkan secara komersial, terutama:

- a. *Coffea Arabica L.* dengan hibridanya;
- b. *Coffea Liberica*;
- c. *Coffea Caephora*, diantaranya varietas robusta.

Tanaman kopi termasuk tumbuhan tropic yang sangat mampu melakukan penyesuaian dengan keadaan kawasan. Walaupun tumbuhan tropic, tanamannya tidak menghendaki suhu tinggi dan memerlukan tumbuhan naungan. Suhu di atas 35 °C dan sebaliknya suhu dingin-beku (*frost*) dapat merusak panen bahkan mematikan tanaman kopi. Tanamannya menghendaki suhu berkisar 15-30 °C.

Untuk pengembangan budidaya secara komersial, perlu diperhatikan bahwa tanaman kopi arabika menghendaki suhu harian antara 15-24°C dan dengan suhu diatas 25°C kegiatan fotosintesis tumbuhannya akan menurun dan akan berpengaruh langsung pada hasil kebun. Tanaman robusta menghendaki suhu sekitar 24-30°C.

Buah kopi terdiri dari beberapa bagian kulit yaitu;



Gambar 2.1. Bagian bagian dari buah kopi [13].

Keterangan :

1. Kulit buah (*exocarp*) berwarna hijau selagi buah belum matang dan berubah menjadi berwarna merah jika buah matang.
2. Daging buah (*mesocarp*) berwarna putih, berair dan agak manis
3. Kulit tanduk (*endocarp*) biji kopi yang keras.
4. Kulit ari yang tipis dan membungkus biji kopi.
5. *Endosperma* merupakan bagian dalam biji kopi yang mengandung unsur dan zat rasa dan aroma kopi dan lain lain kandungan.[13]

2.1.1 Standar Mutu Biji Kopi

Ketentuan mengenai mutu biji kopi pada saat ini umumnya berdasarkan pada penilaian mengenai kandungan cacat cacat biji kopi ada partai biji kopi yang diambil mealalui ‘contoh’ atau ‘sample’ yang mewakili suatu partai biji kopi. Penetapan ‘type’ atau ‘jenis mutu’ didasarkan pada ketetapan nilai cacat (*defect*).

Syarat mutu umum dan khusus biji kopi berdasarkan pada SNI biji kopi nomer 01-2907-2008 adalah sebagai berikut:

Tabel 2.1. Syarat mutu umum biji kopi

No	Kriteria	Satuan	Persyaratan
1	Serangga hidup		Tidak ada
2	Biji berbau busuk dan atau berbau kapang		Tidak ada
3	Kadar air	% fraksi massa	Maksimal 12.5
4	Kadar kotoran	% fraksi massa	Maksimal 0.5

Sumber : SNI 01-2907-2008

Syarat mutu khusus untuk kopi robusta berdasarkan cara pengolahan dan ukuran biji kopi dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.2. Syarat mutu khusus kopi robusta pengolahan kering

Ukuran	Kriteria	Satuan	Persyaratan
Besar	Tidak lolos ayakan berdiameter 6,5 mm (Sieve No. 16)	% fraksi massa	Maks lolos 5
Kecil	Lolos ayakan diameter 6,5 mm, tidak lolos ayakan berdiameter 3,5 mm (Sieve No. 9)	% fraksi massa	Maks lolos 5

Sumber : SNI 01-2907-2008

Tabel 2.3. Syarat mutu khusus kopi robusta pengolahan basah

Ukuran	Kriteria	Satuan	Persyaratan
Besar	Tidak lolos ayakan berdiameter 7,5 mm (Sieve No. 19)	% fraksi massa	Maks lolos 5
Sedang	Lolos ayakan diameter 7,5 mm, tidak lolos ayakan berdiameter 6,5 mm (Sieve No. 16)	% fraksi massa	Maks lolos 5

Kecil Lolos ayakan diameter 6,5 mm, % fraksi massa Maks lolos 5
tidak lolos ayakan berdiameter 5,5
mm (Sieve No. 14)

Sumber : SNI 01-2907-2008

Penentuan besar nilai cacat pada biji kopi pun diatur pada SNI biji kopi nomer 01-2907-2008 sebagai berikut:

Tabel 2.4. Penentuan besarnya nilai cacat biji kopi

No	Jenis Cacat	Nilai Cacat
1	1 (satu) biji hitam	1 (satu)
2	1 (satu) biji hitam sebagian	1/2 (setengah)
3	1 (satu) biji hitam pecah	1/2 (setengah)
4	1 (satu) kopi gelondong	1 (satu)
5	1 (satu) biji coklat	1/4 (seperempat)
6	1 (satu) kulit kopi ukuran besar	1 (satu)
7	1 (satu) kulit kopi ukuran sedang	1/2 (setengah)
8	1 (satu) kulit kopi ukuran kecil	1/5 (seperlima)
9	1 (satu) biji berkulit tanduk	1/2 (setengah)
10	1 (satu) kulit tanduk ukuran besar	1/2 (setengah)
11	1 (satu) kulit tanduk ukuran sedang	1/5 (seperlima)
12	1 (satu) kulit tanduk ukuran kecil	1/10 (sepersepuluh)
13	1 (satu) biji pecah	1/5 (seperlima)
14	1 (satu) biji muda	1/5 (seperlima)
15	1 (satu) biji berlubang satu	1/10 (sepersepuluh)
16	1 (satu) biji berlubang lebih dari satu	1/5 (seperlima)
17	1 (satu) biji bertutul-tutul	1/10 (sepersepuluh)
18	1 (satu) ranting, tanah atau batu berukuran besar	5 (lima)
19	1 (satu) ranting, tanah atau batu berukuran sedang	2 (dua)
20	1 (satu) ranting, tanah atau batu berukuran kecil	1 (satu)

KETERANGAN : Jumlah nilai cacat dihitung dari contoh uji seberat 300 g. Jika satu biji kopi mempunyai lebih dari satu nilai cacat, maka penentuan nilai cacat tersebut didasarkan pada bobot nilai cacat terbesar.

Sumber : SNI 01-2907-2008

2.1.2 Pengolahan Biji Kopi

Penanganan kopi setelah panen dimulai dengan sortasi (pemilihan) gelondong kemudian dilanjutkan dengan pengolahan, sortasi biji dan penyimpanan. Khusus untuk sortasi gelondong, bukan merupakan tahap yang terpisah dari tahap lainnya karena tahap ini sudah dimulai sejak pemetikan dan dilanjutkan kepada tahap pengolahan.

Kopi yang sudah dipetik harus segera diolah lebih lanjut dan tidak boleh dibiarkan begitu saja selama lebih dari 12-20 jam. Bila kopi tidak segera diolah dalam jangka waktu tersebut, maka kopi akan mengalami fermentasi dan proses kimia lainnya yang bias menurunkan mutu. Bila terpaksa belum diolah, maka kopi harus direndam terlebih dulu dalam air bersih yang mengalir.

Prinsip pengolahan buah kopi menjadi biji kopi atau kopi beras adalah melepaskan bagian bagian lain dari biji kopi yang tidak dikehendaki seperti: kulit luar, daging buah, kulit tanduk dan kulit ari. Untuk memperoleh biji kopi tersebut, terdapat 2 cara yaitu cara kering OIB (*Oest Indsche Bereiding*) dan cara basah yang dikenal dengan istilah WIB (*West Indische Bereiding*). Pada umumnya pengolahan biji kopi dengan cara kering dilakukan oleh petani kopi rakyat, sedangkan cara pengolahan basah dilakukan oleh perkebunan perkebunan.

a. Pengolahan Biji Kopi Kering

Prinsip pengolahan biji kopi kering ini adalah buah buah kopi yang dipetik lalu dikeringkan di panas matahari sampai buah buahnya menjadi kering, selama 10-14 hari. Kopi yang telah dikeringkan dapat disimpan sebagai kopi gelondongan dan sebelum dijual kopi tersebut ditumbuk atau dikupas dengan *huller* untuk menghilangkan kulit tanduk dan kulit arinya.

b. Pengolahan Biji Kopi Basah

Disebut pengolahan cara basah karena selama pengolahan memerlukan banyak air. Untuk pengolahan cara basah, buah kopi yang sudah dipetik lalu dimasukan kedalam mesin *pulper* untuk melepas kulit buahnya. Dari mesin *pulper* buah kopi yang sudah terlepas kulitnya kemudian dialirkan ke dalam tempat pengeraman dan direndam selama beberapa hari untuk fermentasi. Setelah diperam buah kopi lalu dicuci dan akhirnya dikeringkan. Pengeringan dilakukan dengan dijemur dipanas matahari atau dengan menggunakan mesin pengering. Kemudian dimasukan ke mesin *huller* atau ditumbuk untuk menghilangkan kuli tanduknya, dan akhirnya dilakukan sortasi.[14].

2.2 Konsep Dasar Pengeringan

Pengeringan adalah proses pengeluaran air dari suatu bahan pertanian menuju kadar air kesetimbangan dengan udara sekeliling atau pada tingkat kadar air dimana mutu bahan pertanian dapat dicegah dari serangan jamur, enzim dan aktifitas serangga [25]. Sedangkan menurut Hall [26] dan Brooker et al., [27], proses pengeringan adalah proses pengambilan atau penurunan kadar air sampai batas tertentu sehingga dapat memperlambat laju kerusakan bahan pertanian akibat aktivitas biologis dan kimia sebelum bahan diolah atau dimanfaatkan.

Pengeringan adalah proses pemindahan panas untuk menguapkan kandungan air yang dipindahkan dari permukaan bahan yang dikeringkan oleh media pengeringan yang biasanya berupa panas. Tujuan pengeringan adalah mengurangi kadar air bahan sampai dimana perkembangan mikroorganisme dan kegiatan enzim yang dapat menyebabkan pembusukan terhambat atau terhenti.

Dengan demikian bahan yang dikeringkan dapat mempunyai waktu simpan yang lebih lama [14].

Pengeringan merupakan salah satu cara dalam teknologi pangan yang dilakukan dengan tujuan pengawetan. Manfaat lain dari pengeringan adalah memperkecil volume dan berat bahan dibanding kondisi awal sebelum pengeringan, sehingga akan menghemat ruang [28].

Dalam pengeringan, keseimbangan kadar air menentukan batas akhir dari proses pengeringan. Kelembapan udara nisbi serta suhu udara pada bahan kering biasanya mempengaruhi keseimbangan kadar air. Pada saat kadar air seimbang, penguapan air pada bahan akan terhenti dan jumlah molekul-molekul air yang akan diuapkan sama dengan jumlah molekul air yang diserap oleh permukaan bahan. Laju pengeringan amat bergantung pada perbedaan antara kadar air bahan dengan kadar air keseimbangan [29].

Semakin besar perbedaan suhu antara medium pemanas dengan bahan pangan semakin cepat pindah panas ke bahan pangan dan semakin cepat pula penguapan air dari bahan pangan. Pada proses pengeringan, air dikeluarkan dari bahan pangan dapat berupa uap air. Uap air tersebut harus segera dikeluarkan dari atmosfer di sekitar bahan pangan yang dikeringkan. Jika tidak segera keluar, udara di sekitar bahan pangan akan menjadi jenuh oleh uap air sehingga memperlambat penguapan air dari bahan pangan yang memperlambat proses pengeringan [30].

Proses pengeringan biji kopi dapat dilakukan dengan cara alami dari sinar matahari dan dengan udara panas dari alat penukar panas.

2.2.1 Pengerinan Dengan Cara Alami

Pengerinan bertujuan untuk memperpanjang umur simpan dengan cara mengurangi kadar air untuk mencegah agar tidak ditumbuhi oleh mikroorganisme pembusuk. Dalam proses pengerinan dilakukan pengaturan terhadap suhu, kelembaban (*humidity*) dan aliran udara. Perubahan kadar air dalam bahan pangan disebabkan oleh perubahan energi dalam sistem. Untuk itu, dilakukan perhitungan terhadap neraca massa dan neraca energi untuk mencapai keseimbangan.

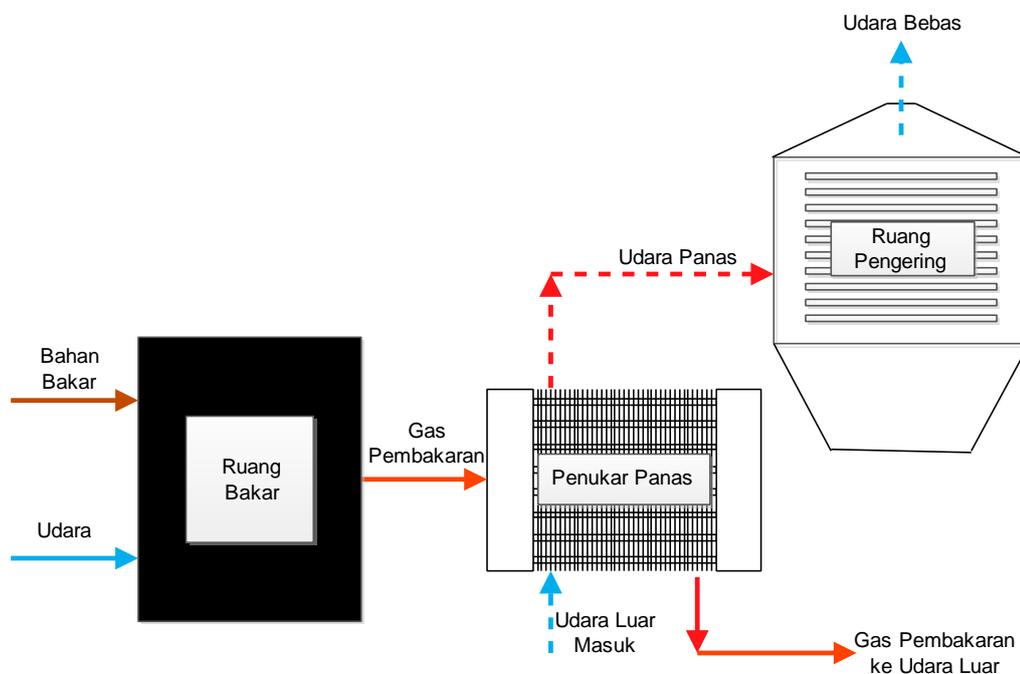
Menurut Banwatt [5] alasan yang mendukung proses pengerinan dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme adalah untuk mempertahankan mutu produk terhadap perubahan fisik dan kimiawi yang ditentukan oleh perubahan kadar air, mengurangi biaya penyimpanan, pengemasan dan transportasi, untuk mempersiapkan produk kering yang akan dilakukan pada tahap berikutnya, menghilangkan kadar air yang ditambahkan akibat selama proses sebelumnya, memperpanjang umur simpan dan memperbaiki kegagalan produk. Produk kering dapat digunakan sebagai bahan tambahan dalam pembuatan produk baru.

Tujuan pengerinan biji kopi adalah untuk menurunkan kadar air dari 53% - 55% menjadi 11%- 12% [3],[4]. Ada beberapa cara pengerinan yakni dengan sinar matahari, dengan alat pengering dan kombinasi keduanya. Pengerinan kombinasi yaitu pengerinan dengan panas sinar matahari dan panas buatan. Cara ini lebih baik karena tidak tergantung cuaca dan bahan bakar lebih sedikit. Pengerinan dengan sinar matahari menjadikan mutu biji kop lebih baik. Caranya adalah biji kopi ditebarkan di lantai penjemuran di bawah terik matahari. Pengerinan ini membutuhkan tenaga kerja lebih banyak dan sangat tergantung dengan cuaca. Jika cuaca tidak memungkinkan dapat diganti dengan hembusan udara pada pengerinan buatan. Pada tahap awal dengan suhu lingkungan selama 72-80 jam dan diteruskan

dengan suhu udara 45- 60°C sampai buah kering. Lama pengeringan ini 7-8 jam sehari. Lama penjemuran dapat lebih dari 10 hari.

2.2.2 Pengeringan Dengan Udara Panas

Secara buatan proses pengeringan dapat dilakukan dengan alat pengering untuk menghemat tenaga manusia, terutama pada musim hujan. Terdapat berbagai cara pengeringan buatan, salah satunya dengan memanfaatkan aliran udara yang dipanaskan untuk mengurangi kadar air di dalam biji kopi dengan panas pengeringan sekitar 50°C – 60°C, sehingga kadar air turun menjadi 11% -12 %. Proses perpindahan panas dengan cara ini berlangsung secara konduksi dan konveksi. Udara bergerak melintasi hamparan biji kopi setelah terlebih dahulu melalui penukar panas. Alat pengering dapat digunakan setiap saat dan dapat dilakukan pengaturan suhu sesuai dengan kadar air biji kopi yang diinginkan. Cara ini lebih baik karena tidak tergantung cuaca dan bahan bakar lebih sedikit.



Gambar 2.2 Skema sistem pengeringan udara panas.[23]

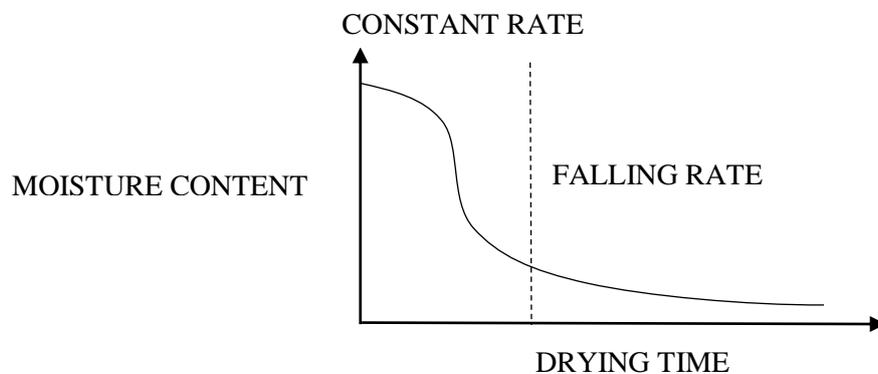
Udara panas di dalam ruang pengering diperoleh dari perpindahan panas dari alat penukar kalor (*heat exchanger*) tipe *compact* yang berfungsi untuk memanaskan udara. Udara panas ini digunakan untuk mengurangi kadar air biji kopi. Pergerakan udara didalam ruang pengering berlansung secara paksa, dimana udara bergerak karena ada kipas untuk mendorong udara masuk kedalam ruang pengering melewati alat penukar kalor.

2.3 Prinsip Pengeringan

Pengeringan biji kopi didefinisikan sebagai proses pengurangan kandungan air dari biji kopi. Pengurangan kandungan air biji kopi umumnya dilakukan dengan memberikan panas. Dalam hal ini akan terjadi dua proses secara simultan, yaitu:

1. Perpindahan panas udara dari ruang pengering menuju biji kopi.
2. Perpindahan massa air dari biji kopi ke udara.

Air pada biji kopi yang telah diuapkan dianggap terdiri dari air bebas dan air terikat. Air bebas didefinisikan sebagai sejumlah air dalam biji kopi yang ikatannya sangat longgar sehingga lebih mudah menguap dibandingkan dengan air terikat yang ikatannya lebih kuat.



Gambar 2.3 Grafik laju pengeringan terhadap kandunagn air bahan [16]

. Laju pengeringan pada proses pengeringan udara tergantung pada kondisi udara, sifat kopi, dan desain alat pengering. Laju pengeringan terdiri dari laju pengeringan tetap (*constant rate periode*) dan laju pengeringan menurun (*falling rate periode*)[15].

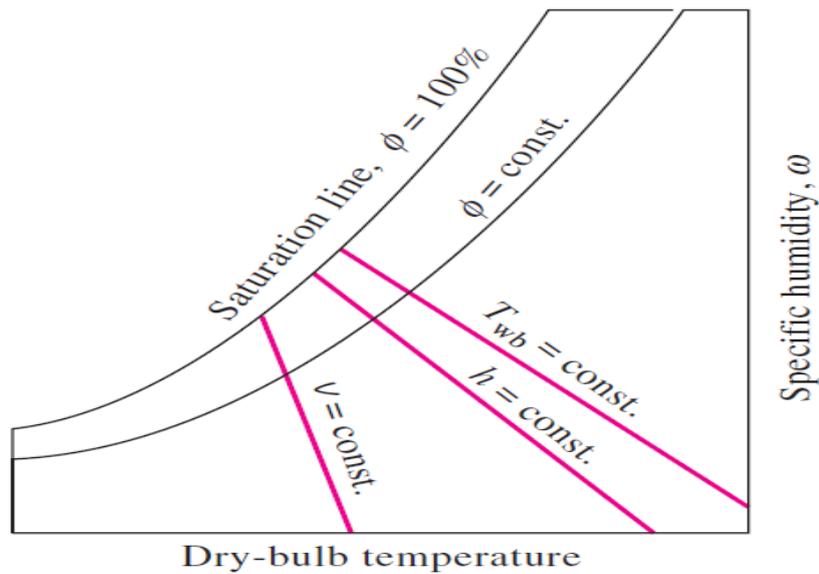
Pengeringan lapisan tipis untuk biji-bijian (*grain*) berhubungan langsung dengan udara pengering. Pengeringan lapisan tipis memenuhi persamaan berikut [17]. Proses pengeringan biji kopi menggunakan panas laten (*latent heat*) yang terkandung dalam udara panas. Proses pengeringan yang terjadi diasumsikan berjalan secara adiabatik, dimana seluruh panas yang hilang digunakan untuk proses penguapan air pada biji kopi.

2.4 Faktor Yang Mempengaruhi Pengeringan

Ada tiga faktor utama yang mempengaruhi pengeringan yaitu: temperatur udara, kelembaban udara dan aliran udara. Memperluas aliran udara dengan memperbesar saluran udara masuk ke alat pengering menyebabkan turunnya temperatur udara dalam ruang pengering. Pengurangan luas udara masuk ke alat pengering menyebabkan temperature udara meningkat dan kelembaban relatif udara menurun [15].

2.5 Bagan Psikrometrik (*Psychrometric Chart*)

Psikrometrik merupakan kajian tentang sifat sifat campuran udara dan uap air karena kondisi udara di atmosfer tidak kering bebas. Bagan psikrometrik sangat berguna dalam menentukan sifat sifat udara pada proses pengeringan karena umumnya digambar pada tekanan 1 atm [18].



Gambar 2.4 Skema dari *psychrometric chart* .[21]

Beberapa istilah yang berhubungan dengan bagan psikrometrik antara lain:

a. Udara lembab (*Moist Air*)

Merupakan campuran udara kering dengan uap air. Jumlah uap air yang terkandung di dalam udara sangat bergantung kepada tekanan serta temperatur udara dan uap air.

b. Udara Jenuh (*Saturated Air*)

Merupakan campuran udara kering dengan uap air dimana jumlah uap air di dalam udara sudah maksimum. Setiap penurunan temperatur menyebabkan udara terkondensasi menjadi air.

c. Rasio Kelembaban (*Humidity Ratio*)

Adalah berat atau massa air yang terkandung dalam setiap kilogram udara kering. Rasio kelembaban ditentukan dengan dasar 1 kg, seperti beberapa sifat yang akan dipelajari, yaitu entalpi dan volume spesifik. Dalam teknik pengkondisian udara, untuk menghitung perbandingan (rasio) kelembaban

dapat digunakan persamaan gas ideal, jadi uap air dan udara dapat dianggap sebagai gas ideal, sehingga mengikuti persamaan $pV = RT$ serta mempunyai kalor spesifik yang tetap. Udara dianggap sebagai gas ideal karena temperaturnya cukup tinggi dibandingkan temperatur jenuhnya dan uap air dianggap ideal karena tekanannya cukup rendah dibandingkan dengan tekanan jenuhnya.

$$W = \frac{m_w}{m_a} = \frac{p_s V / R_s T}{p_a V / R_a T} = \frac{p_s / R_s}{(p_t - p_s) / R_a} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dengan mensubstitusikan nilai numeris R_a dan R_s ke dalam Persamaan 2.4 diperoleh

$$W = \frac{287}{461.5} \frac{P_s}{p_t - P_s} = 0,622 \frac{P_s}{p_t - P_s} \dots\dots\dots (2.2)$$

d. Kelembaban relatif (*relative humidity*)

Didefinisikan sebagai perbandingan fraksi molekul uap air dalam udara basah terhadap fraksi molekul uap air jenuh pada temperatur dan tekanan yang sama.

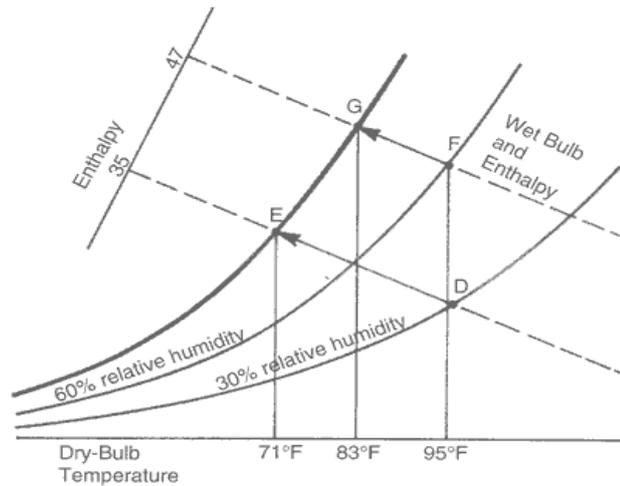
Dari hubungan-hubungan untuk gas ideal, ϕ dapat dinyatakan dengan:

$$\phi = \frac{P_v}{P_s} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dengan :

P_v = Tekanan uap air parsial

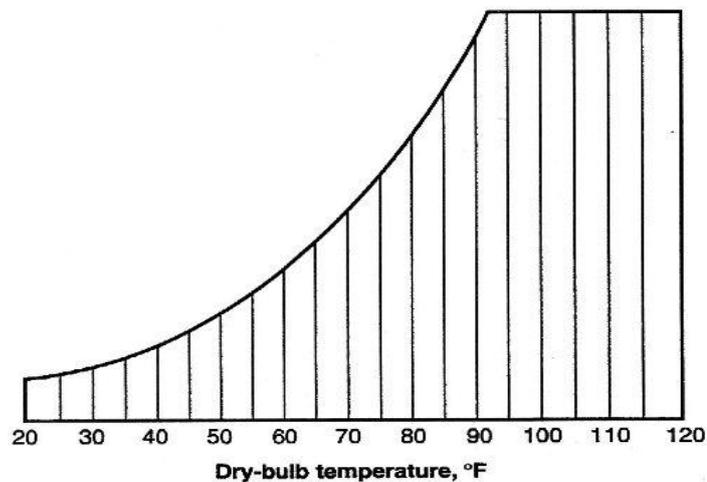
P_s = Tekanan jenuh air murni pada suhu yang sama



Gambar 2.5 Diagram kelembaban udara relatif.[9]

e. Temperatur bola kering (*dry bulb temperature*)

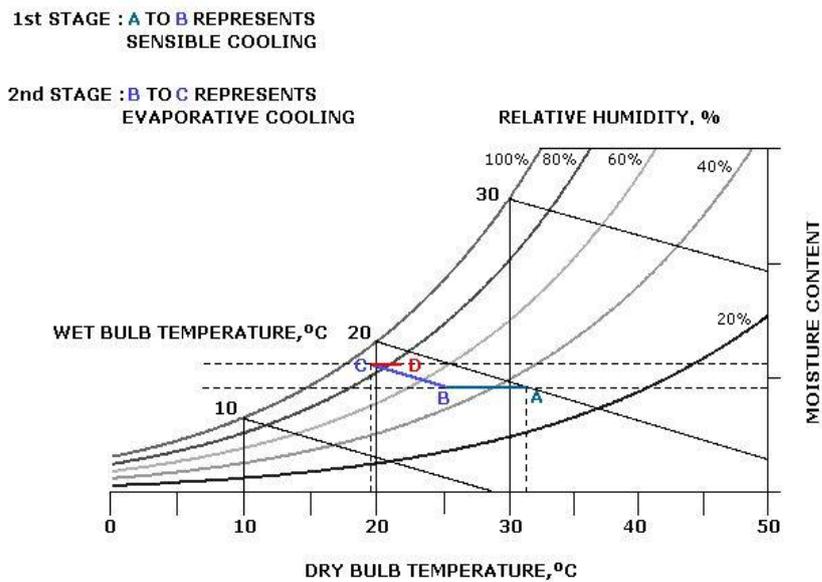
Merupakan temperatur udara yang terbaca pada termometer sensor kering ketika termometer tidak dipengaruhi oleh kelembaban yang ada dalam udara.



Gambar 2.6 Diagram temperatur bola kering.[9]

f. Temperatur bola basah (*wet bulb temperature*)

Merupakan temperatur udara yang terbaca pada termometer pada saat termometer dilengkapi dengan sumbu basah. Jika lingkungan udara dalam keadaan tak jenuh maka air dalam sumbu akan menguap dan temperatur air berkurang di bawah tempertur bola kering.



Gambar 2.7 Diagram temperatur bola basah

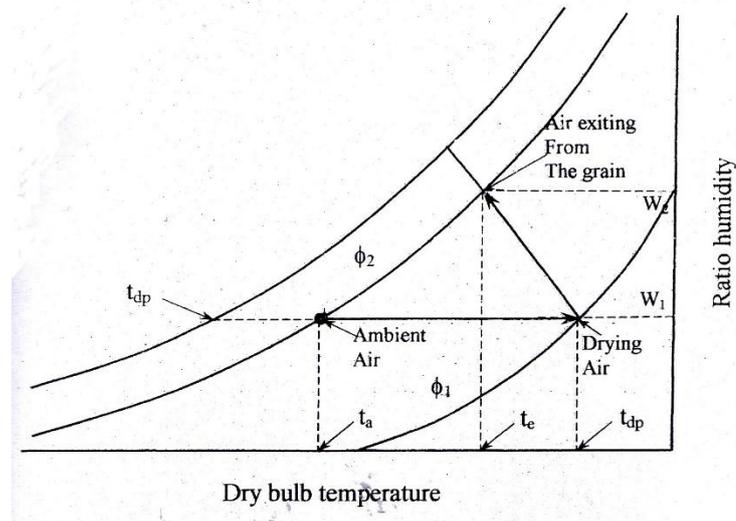
g. Temperatur titik embun (*dew point temperature*)

Adalah temperatur dimana terjadi kondensasi ketika udara didinginkan pada rasio kelembaban dan tekanan konstan. Temperatur titik embun pada diagram psikrometrik dibaca pada daerah temperatur bola kering yang berhubungan dengan kurva kelembaban relatif.

2.6 Proses Yang Terjadi Selama Proses Pengeringan

Proses pengeringan yang terjadi berlangsung secara adiabatik dengan pengertian bahwa panas yang dibutuhkan untuk menguapkan kandungan air pada biji kopi berasal dari udara panas didalam alat pengering saja. Gambar 2.8 menjelaskan kondisi awal dengan temperatur lingkungan t_a (*ambient temperatur*) dan temperatur titik embun t_{dp} (*dew point temperatur*) dipanaskan hingga mencapai temperatur udara pengering t_d yang memiliki kelembaban relatif ϕ_1 . Selama proses pemanasan berlangsung, perubahan temperatur udara diasumsikan

terjadi tanpa mengalami perubahan kandungan air pada biji kopi. Udara akan mempertahankan rasio kelembaban pada nilai yang konstan.



Gambar 2.8 Diagram proses pengeringan adiabatik.[9]

Pada saat udara panas melalui biji kopi yang ingin dikeringkan maka udara panas akan memberikan panas laten untuk proses penguapan air dalam biji kopi. Pada saat air keluar dari biji kopi, temperatur turun menjadi t_e dan kelembaban udara relatif udara naik menjadi ϕ_2 . Air yang diuapkan tiap kilogram udara kering adalah $W_2 - W_1$. Selama proses pengeringan berlangsung, terjadi penurunan temperatur bola kering, kenaikan kelembaban udara relatif, dan kenaikan tekanan uap air udara jenuh.

2.7 Perpindahan Panas Dalam Proses Pengeringan

Panas diberikan untuk mengeringkan biji kopi dan menguapkan air yang terkandung dalam biji kopi. Sumber panas yang digunakan adalah air geothermal. Mekanisme perpindahan panas menuju biji kopi dilakukan dengan tiga cara yaitu: konduksi, konveksi, dan radiasi. Dalam proses pengeringan tidak tertutup kemungkinan bahwa konduksi, konveksi dan radiasi terjadi secara bersamaan.

Tetapi lebih sering ditemukan bahwa salah satu cara perpindahan panas akan lebih dominan dibandingkan dengan yang lain.

Perpindahan panas konveksi dalam ruang penering terjadi secara alamiah. Konveksi alamiah (*natural convection*) atau konveksi bebas (*free convection*) terjadi karena fluida yang terkena proses pemanasan berubah densitasnya dan bergerak naik. Gerakan fluida dalam konveksi bebas terjadi karena gaya apung (*buoyancy force*) yang dialaminya apabila densitas fluida dekat permukaan perpindahan panas berkurang sebagai akibat proses pemanasan. Gaya apung tersebut tidak akan terjadi apabila fluida tidak mengalami suatu gaya dari luar seperti gravitasi, meskipun gravitasi bukanlah satu satunya medan gaya luar yang dapat menghasilkan arus konveksi bebas [9],[10].

2.8 Rumus Empiris Untuk Konveksi Bebas

Koefisien perpindahan pans konveksi bebas rata rata untuk berbagai situasi dapat dinyatakan dalam bentuk fungsi sebagai berikut [9]:

$$Nu_f = C(Gr_f Pr_f)^m \dots\dots\dots (2.4)$$

Dengan

$$Gr_x = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)x^3}{\nu^2} \dots\dots\dots (2.5)$$

Yang dapat ditafsirkan secara fisis sebagai suatu gugus tak berdimensi yang menggambarkan perbandingan antara gaya apung dengan gaya viskos dalam sistem aliran konveksi bebas dan subskrip f menunjukkan sifat-sifat untuk gugus tak berdimensi dievaluasi pada temperatur rata rata.[9],[10].

$$T_f = \frac{T_\infty - T_w}{2} \dots\dots\dots (2.6)$$

Produk perkalian antara angka grashof dan angka Prandl disebut dengan bilangan Rayleigh [9],[10].

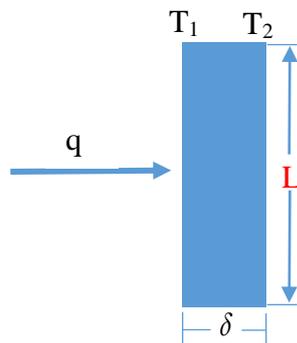
$$Ra = Gr.Pr \dots\dots\dots (2.7)$$

2.9 Konveksi Bebas Dalam Ruang Tertutup

Gambar 2.9 menjelaskan fluida diantara dua plat vertikal yang terpisah dengan jarak δ . Jika fluida tersebut diberi beda suhu $\Delta T_w = T_1 - T_2$ maka terjadilah perpindahan panas. Dalam gambar tersebut, angka Grashof dihitung sebagai [9].

$$Gr_\delta = \frac{g\beta(T_1 - T_2)\delta^3}{\nu^2} \dots\dots\dots (2.8)$$

Angka Grashof yang sangat rendah menyebabkan sedikit arus konveksi bebas dan perpindahan panas berlangsung terutama melalui konduksi melintasi lapisan itu. Pada angka grashof yang lebih tinggi terdapat berbagai ragam aliran dan perpindahan panas meningkat dengan teratur seperti dinyatakan dengan angka Nusselt [9]



Gambar 2.9 Konveksi bebas dalam ruang vertikal tertutup [9].

$$Nu_\delta = \frac{h\delta}{k} \dots\dots\dots (2.9)$$

Fluks kalor dihitung sebagai:

$$\frac{q}{A} = q_w = h(T_1 - T_2) = Nu_\delta \frac{k}{\delta} (T_1 - T_2) \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

Hasil ini sering dinyatakan dengan istilah konduktivitas termal kentara (*apparent thermal conductivity*) k_e atau konduktivitas termal efektif yang didefinisikan sebagai [9]:

$$\frac{q}{A} = k_e \frac{T_1 - T_2}{\delta} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

Dengan membandingkan dua persamaan diatas maka :

$$Nu_\delta = \frac{k_e}{k} \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

Perpindahan panas melintasi celah udara sering dinyatakan dengan nilai R, sehingga:

$$\frac{q}{A} = \frac{\Delta T}{R} \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

Sesuai dengan bahasan diatas maka nilai R adalah:

$$R = \frac{\delta}{k_e} \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

Perpindahan panas pada ruang tertutup horizontal menyangkut dua situasi yang berbeda. Jika plat atas berada pada suhu yang lebih tinggi dari plat bawah maka fluida yang densitasnya lebih rendah berada diatas fluida yang densitasnya lebih tinggi dan tidak terjadi arus konveksi. Proses pemanasan atau pendinginan konveksi alamiah dan ruang tertutup berbentuk silinder vertikal atau horizontal dapat dihitung dengan. [9]

$$Nu_f = 0.55(Gr_f Pr_f)^{1/4} \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

Untuk rentang $0.75 < L/d < 2,0$. Hasil hasil percobaan untuk konveksi bebas dalam ruang tertutup tidak selalu sama satu dengan yang lain, tetapi semuanya dapat dinyatakan dalam bentuk umum sebagai berikut [9].

$$\frac{k_e}{k} = C(Gr_\delta Pr)^n \left(\frac{L}{\delta}\right)^m \dots\dots\dots (2.16)$$

Nilai nilai konstanta C,n dan m untuk berbagai situasi fisis dapat dilihat pada tabel 2.5. Nilai tersebut dapat digunakan untuk tujuan perencanaan apabila ada data untuk geometri atau fluida yang dimaksud.

2.10 Kandungan Air (*Moisture Content*)

Ada dua cara untuk menyatakan kandungan air kopi, yaitu:

1. Basis basah (*wet basis*) diperoleh dengan membagi berat awal biji kopi dengan berat total biji kopi.
2. Basis kering (*dry basis*) diperoleh dengan membagi berat awal biji kopi dengan berat total biji kopi.

Hubungan antara basis basah dengan basis kering dan sebaliknya adalah sebagai berikut:

$$M_{db} = \frac{M_{wb}}{(100 - M_{wb})} x100\% \dots\dots\dots (2.17)$$

$$M_{wb} = \frac{M_{db}}{(100 - M_{db})} x100\% \dots\dots\dots (2.18)$$

2.11 Jumlah Air Yang Diuapkan

Udara panas dari kolektor masuk ke ruang pengering untuk menguapkan kandungan air pada biji kopi. Kemampuan pengurangan kandungan air oleh ruang

pengering akan mempengaruhi hasil akhir dari proses pengeringan. Jumlah air yang diuapkan selama proses pengeringan dihitung dengan persamaan [11].

$$m_w = \frac{w_i(mc_1 - mc_2)}{100\% - mc_2} \dots\dots\dots (2.19)$$

2.12. Penurunan Tekanan

Penurunan tekanan antara kedua sisi atas dan bawah rak pengering terjadi akibat perbedaan massa jenis udara di kedua sisi rak pengering. Penurunan tekanan udara diperoleh dengan menggunakan persamaan.

$$\Delta p = [H_1(\rho_\infty - \rho_1) + H_2(\rho_\infty - \rho_2)]g \dots\dots\dots (2.20)$$

Dan penurunan tekanan udara juga ditentukan melalui fungsi kecepatan udara ($m / \rho A$) serta jarak antar rak pengering ΔH , yaitu [11]:

$$\Delta p = \frac{m\Delta H}{K\rho_\infty A} \dots\dots\dots (2.21)$$

Dimana nilai massa jenis udara diperoleh dengan menggunakan persamaan gas ideal.

$$\rho = \frac{p}{RT} \dots\dots\dots (2.22)$$

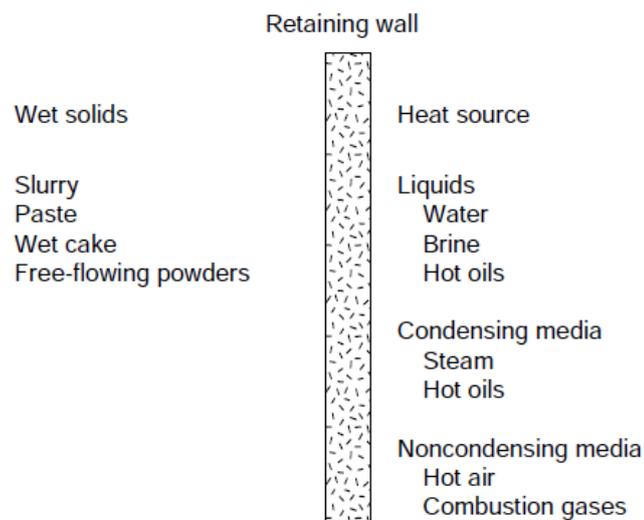
2.13 Jenis Jenis Pengeringan

Terdapat beberapa metode pengeringan biji kopi yang masih digunakan, yaitu pengeringan alamiah menggunakan panas matahari, pengeringan menggunakan bahan bakar dan pengeringan gabungan.

2.13.1 Indirect Dryers

Pengeringan dilakukan dengan mentransfer udara panas ke bahan yang masih basah melalui dinding penahan. Laju pengeringan tergantung pada kontak

bahan basah dengan permukaan panas. Menurut Hall (1980), *Indirect Dryers* (atau kontak atau konduktif) adalah pengering dimana media pemanas (misalnya, uap, gas panas, cairan panas) tidak langsung berkontak dengan produk yang dikeringkan. Sebaliknya, bahan basah yang dikeringkan dengan kontak langsung dengan permukaan yang dipanaskan [22].

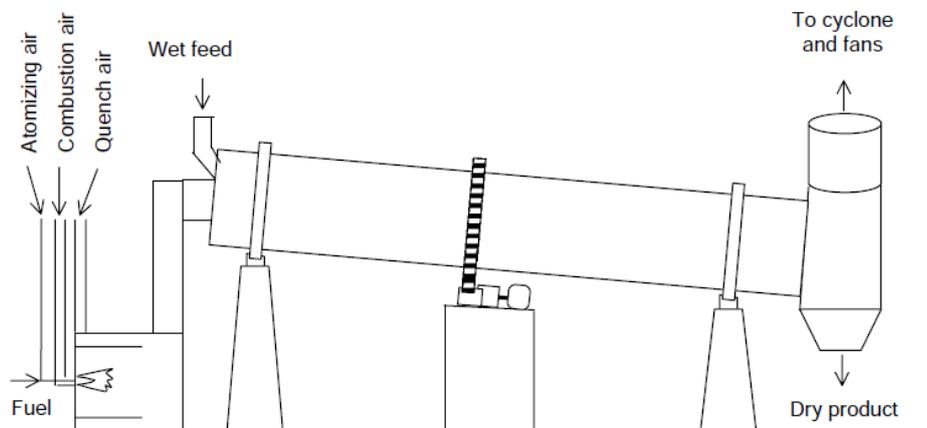


Gambar 2.10 Skema diagram dari karakteristik *indirect dryer*. [17]

Karakteristik pengering tidak langsung adalah panas terselubung, ruangan logam ber dinding baik diam maupun berputar dan kontak dengan bahan basah dikeringkan. Dalam beberapa kasus, ruang pengering dilengkapi dengan penggerak. Kondensasi uap (medium pemanas yang paling populer), air panas, gas pembakaran, garam cair, atau listrik (kurang populer karena biaya tinggi yang terlibat) dapat digunakan untuk memanaskan selubung, yang pada gilirannya transfer panas ke permukaan pengeringan (dengan konduksi atau, dalam beberapa kasus, konduksi dan radiasi). Media pemanas dan produk yang akan dikeringkan dipisahkan oleh permukaan pengeringan seperti yang ditunjukkan secara skematis pada gambar 2.10.

2.13.2 Rotary Drying

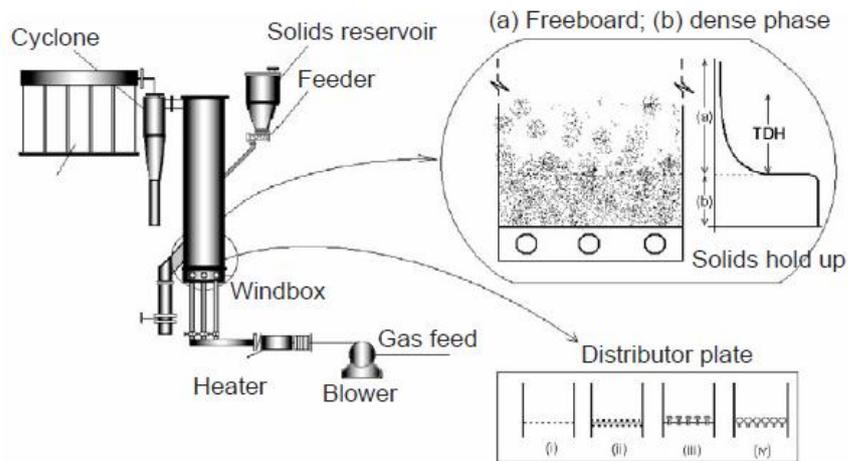
Rotary Drying adalah salah satu dari banyak metode pengeringan yang ada di unit operasi teknik kimia. Pengeringan berlangsung di *rotary drying*, yang terdiri dari *shell* silinder diputar pada bantalan dan biasanya sedikit cenderung horizontal. Sebuah diagram sederhana dari sebuah *rotary drying* langsung dapat dilihat pada gambar 2.11. Arah aliran gas melalui silinder relative untuk padatan ditentukan terutama oleh sifat-sifat bahan yang diproses. Aliran tidak langsung digunakan untuk panas yang sensitif bahan bahkan untuk suhu gas inlet tinggi karena pendinginan yang cepat dari gas selama awal penguapan air, sedangkan untuk lainnya bahan aliran berlawanan arah yang diinginkan untuk mengambil keuntungan dari efisiensi termal yang lebih tinggi yang dapat dicapai dengan cara ini. [17]



Gambar 2.11 Diagram sederhana untuk rotary drying langsung.[17]

2.13.3 Fluidized Bed Dryers

Fluidized Bed Dryers (FBD) digunakan secara ekstensif untuk pengeringan partikel basah dan bahan granular yang dapat terfluidisasi, dan bahkan lumpur, pasta, dan suspensi yang dapat terfluidisasi di bed dari lembam padatan.



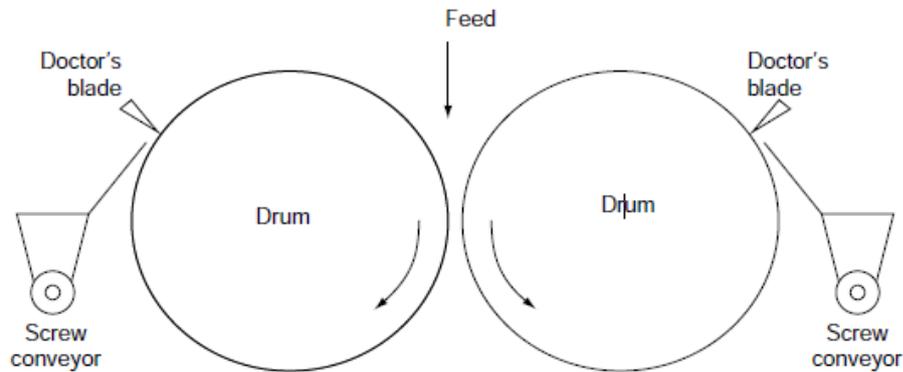
Gambar 2.12 Pemasangan *fluidized bed dryers*[17]

Mereka umumnya digunakan dalam banyak pengolahan produk seperti bahan kimia, karbohidrat, bahan makanan, biomaterial, produk minuman, keramik, obat-obatan dalam bentuk bubuk atau diaglomerasi bentuk, kesehatan produk, pestisida dan bahan kimia pertanian, zat warna dan pigmen, deterjen dan bahan aktif permukaan, pupuk, polimer dan resin, tanin, produk untuk kalsinasi, pembakaran, pembakaran, pengelolaan sampah proses, dan proses perlindungan lingkungan. Udara panas dipaksa melalui partikel partikel produk dengan kecepatan yang cukup tinggi agar melebihi gaya gravitasi, sehingga partikel partikel produk yang dikeringkan tersebut delalu dalam posisi melayang-layang dalam udara panas pengering [17].

2.13.4 *Drum Dryer*

Drum Dryer umumnya digunakan untuk mengeringkan bahan yang kental, solusi terkonsentrasi, lumpur atau pasta dan di berputar dengan uap yang dipanaskan dalam drum. Hal ini juga dapat digunakan untuk mengeringkan solusi terkonsentrasi atau bubur yang menjadi lebih kental atau pucat karena berkedip

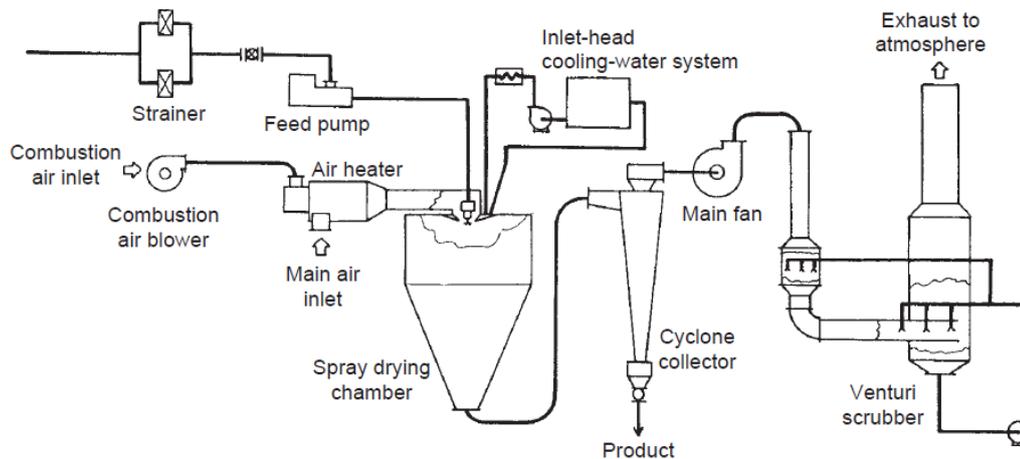
atau mendidih off kelembaban atau transformasi termokimia tidak dapat diubah dari konten mereka yang terjadi pada pertama mereka kontak dengan permukaan drum panas.[17]



Gambar 2.13 *Double drum dryer.*[17]

2.13.5 *Spray Dryer*

Spray dryer merupakan suatu alat pengering yang digunakan untuk mengurangi kadar air suatu bahan sehingga dihasilkan produk berupa bubuk melalui penguapan cairan. *Spray dryer* menggunakan atomisasi cairan untuk membentuk droplet, selanjutnya droplet yang dikeringkan menggunakan udara kering dengan suhu dan tekanan yang tinggi. Bahan yang digunakan dalam pengeringan *spray dryer* dapat berupa suspensi, disperse maupun emulsi. Sementara produk akhir yang dihasilkan dapat berupa produk bubuk, granula maupun aglomerat tergantung sifat fisik-kimia bahan yang akan dikeringkan, desain alat pengering dan hasil akhir produk yang diinginkan.[17]



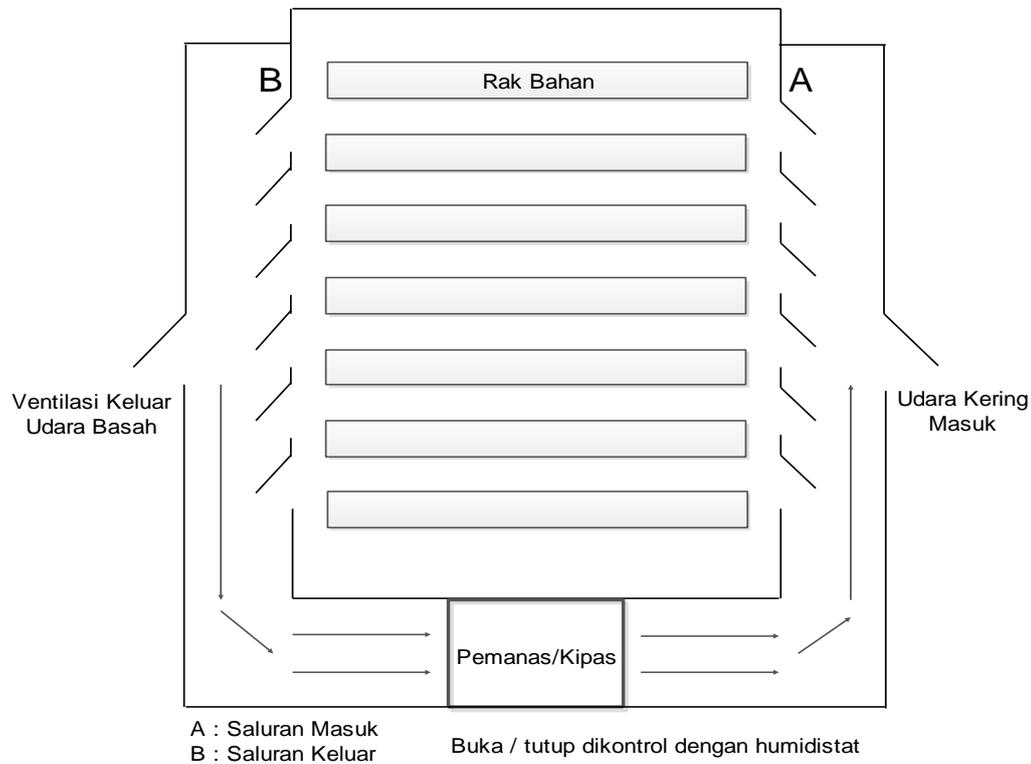
Gambar 2.14 *Spray-drying process.*[17]

2.13.6 Cabinet Dryer

Cabinet dryer merupakan alat pengering yang menggunakan udara panas dalam ruang tertutup (*chamber*). Ada dua tipe yaitu *tray dryer* dan *vacuum dryer*. *Vacuum dryer* menggunakan pompa dalam penghambusan udara, sedangkan pada *tray dryer* tidak menggunakan pompa [6]. Produk yang sesuai dikeringkan dengan alat ini adalah produk yang memiliki keseragaman yang tinggi misalnya kakao, jagung, pisang dan kopra. Kelebihannya adalah harga murah, karena membutuhkan daya yang tidak terlalu tinggi [7].

Komponen *cabinet dryer* adalah *tray*, *heater* dan *fan*. *Tray* disesuaikan dengan kapasitas jumlah, berat dan ukuran produk pangan. *Tray* berfungsi sebagai wadah kopra dalam proses pengeringan, yang disusun bertingkat. Sedangkan *heater* berfungsi sebagai pemanas udara atau pengering udara dan penghambus udara kering yang akan digunakan dalam pengeringan [8]. *Heater* memiliki medium pemanas berupa steam. Kualitas steam yang digunakan adalah 90%, agar dapat memanaskan udara secara optimal yang dapat memenuhi kebutuhan panas

udara kering dalam pengeringan. Suhu steam yang digunakan adalah 120°C [8]. Suhu tersebut mampu menghasilkan kalor untuk mengeringkan udara secara optimal.



Gambar 2.15 Skema aliran udara pada tipe *cabinet dryer*. [23]

Dalam perhitungan neraca panas, dibutuhkan data-data yaitu panas spesifik, panas latent, RH (%) dan suhu sehingga diperoleh hubungan antara RH (%) udara dengan kadar air dalam bahan pangan pada grafik *psychrometric charts* [6]. Hubungan tersebut menentukan berapa panas masuk dan keluar yang setimbang. Selain itu, juga menentukan panas yang hilang dalam proses pengeringan. Selain neraca panas, juga dibutuhkan neraca massa untuk mengetahui keseimbangan antara berapa produk yang masuk dengan berapa yang keluar serta berapa uap air yang dilepaskan dalam proses. Ini berpengaruh juga pada perubahan fraksi air dalam bahan pangan [6].

2.14 Jarak Antara Rak Pengering

Jarak antara rak pengering mempengaruhi distribusi temperatur udara selama berada dalam ruang pengering. Parameter ini diperoleh dari kapasitas pengeringan yang harus dikeringkan [11].

$$V = \frac{W_i}{\rho_{kopi}} = A\Delta H \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

2.15 Efisiensi Ruang Pengering

Efisiensi ruang pengering didefinisikan sebagai perbandingan penggunaan panas teoritis pada alat pengering dengan panas hasil perancangan yang dibutuhkan untuk mengeringkan kopi [12].

$$\eta = \frac{q_{teoritis}}{q_{perancang}} \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

Tabel 2.5 Rumus empiris untuk konveksi bebas dalam ruang tertutup, konstanta korelasi disesuaikan oleh Holman [9].

Fluida	Geometri	$Gr_{\delta} Pr$	Pr	L/δ	C	n	m	
Gas	Pelat vertikal, Isothermal	< 2000	$K_e/k = 1,0$					
		6000 – 200000	0,5 – 2	11 – 42	0,197	1/4	-1/9	
		200000 – $1,1 \times 10^7$	0,5 – 2	11 – 42	0,073	1/3	-1/9	
	Pelat Horizontal, Isothermal, dipanaskan dari bawah	<1700	$K_e/k = 1,0$					
		1700 – 7000	0,5 – 2			0,059	0,4	0
		7000 – $3,2 \times 10^5$	0,5 – 2			0,212	1/3	0
	> $3,2 \times 10^5$	0,5 – 2			0,061	1/4	0	
Zat cair	Pelat Vertikal, Fluks kalor tetap atau isothermal	<2000	$K_e/k = 1,0$					
		$10^4 - 10^7$	1 – 20000	10 – 40	0,046	1/3	0	
		$10^6 - 10^9$	1 – 20	1 – 40				
	Pelat horizontal, Isothermal, dipanaskan dari bawah	<1700	$K_e/k = 1,0$			0,012	0,6	0
		1700 – 6000	1 – 5000			0,375	0,2	0
		6000 – 37000	1 – 5000			0,13	0,3	0
		37000 – 10^8	1 – 20			0,57	1/3	0
		> 10^9	1 – 20					
Gas atau zat cair	Annulus vertikal	Sama seperti pelat vertikal						
		6000 – 10^6	1 – 5000		0,11	0,29	0	
	Annulus horizontal, isothermal, annulus bola	$10^6 - 10^8$	1 – 5000		0,40	0,20	0	
		120 – $1,1 \times 10^9$	0,7 - 4000		0,228	0,226	0	