

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengerinan

Pengerinan menurut James C Atuonwu (2011) pada dasarnya adalah proses pengurangan kadar air dari suatu bahan atau pemisahan yang relatif kecil dari bahan dengan menggunakan energi panas. Hasil dari proses pengerinan adalah bahan kering yang mempunyai kadar air yang lebih rendah. Pada proses pengerinan ini air diuapkan menggunakan udara tidak jenuh yang dihembuskan pada bahan yang akan dikeringkan. Air (atau cairan lain) menguap pada suhu yang lebih rendah dari titik didihnya karena adanya perbedaan kandungan uap air pada bidang antar-muka bahan padat-gas dengan kandungan uap air pada fasa gas. Gas panas disebut medium pengerin, menyediakan panas yang diperlukan untuk penguapan air dan sekaligus membawa air keluar. Dengan tujuan dari pengerinan yaitu :

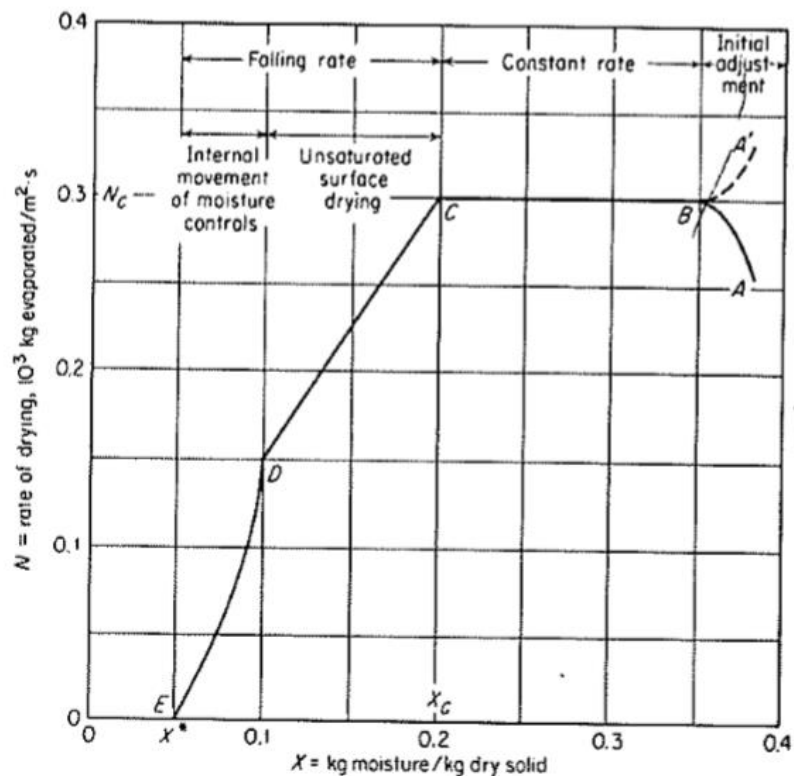
1. Pengawetkan bahan
2. Mengurangi biaya transportasi bahan dan pengemasan
3. Mempermudah penanganan dari bahan untuk proses selanjutnya
4. Mendapatkan mutu produk hasil yang diinginkan

2.1.1 Prinsip dasar pengerinan

Pengerinan adalah suatu proses penguapan air dari bahan basah dengan media pengerin menyangkut proses perpindahan panas dan massa yang terjadi secara bersamaan. Proses perpindahan massa yang terjadi adalah dengan cara konveksi serta perpindahan panas secara konduksi dan radiasi tetap terjadi dalam jumlah yang relatif kecil yang terjadi antara medium pengerin dengan bahan.

Selanjutnya setelah terjadi penguapan air, uap air yang terbentuk harus dipindahkan melalui struktur bahan ke medium sekitarnya. Proses ini akan menyakut aliran fluida dengan cairan harus ditransfer melalui struktur bahan selama proses

pengeringan berlangsung. Panas harus disediakan untuk menguapkan air dan air harus mendifusi melalui berbagai macam tahanan agar dapat lepas dari bahan dan berbentuk uap air yang bebas. Lama proses pengeringan tergantung pada bahan yang dikeringkan dan cara pemanasan yang digunakan. Adapun penguapan air dalam bahan terjadi dalam 3 tahapan, yaitu: pemanasan pendahuluan atau penyesuaian temperatur bahan yang dikeringkan, pengeringan dengan kecepatan konstan (Constant Rate Periode), dan pengeringan dengan kecepatan menurun (Falling Rate Periode) (Treyball, 1983), yaitu :



Gambar 2.1 Kurva laju pengeringan terhadap kadar air bahan
(Sumber: Treyball, 1983)

1. Priode Pengeringan dengan laju tetap (Constant rate peroid)

Pada priode ini bahan-bahan yang dikeringkan memiliki kecepatan

pengeringan yang konstan. Bahan basah mempunyai kandungan air yang akan membentuk lapisan air di permukaan. Proses penguapan pada priode ini terjadi pada titik air tak terikat, dimana suhu pada bahan sama dengan suhu bola basah udara pengering. Priode pengeringan laju tetap dapat dianggap dalam keadaan steady

2. Priode pengeringan dengan laju menurun (Falling Rate Peroid)

Pada priode ini air yang diuapkan sangat kecil dan membutuhkan waktu pengeringan yang lama. Di priode ini air tidak cukup lagi untuk membuat lapisan air pada permukaan bahan sehingga permukaan tidak lagi basah. Selanjutnya pengeringan terjadi lebih lambat. Panas untuk evaporasi ditransfer dari permukaan bahan dan air dari dalam bahan berpindah keluar dengan cara difusi dan perpindahan secara kapiler pada bahan. Mekanisme keluarnya air dari dalam bahan selama pengeringan adalah sebagai berikut:

1. Air bergerak melalui tekanan kapiler
 2. Penarikan air disebabkan oleh perbedaan konsentrasi lauran di setiap bagian bahan
 3. penarikan air ke permukaan bahan disebabkan oleh absorpsi dari lapisan-lapisan permukaan komponen padatan dari bahan
 4. perpindahan air dari bahan ke udara disebabkan oleh perbedaan tekanan uap
- Adapun beberapa faktor yang perlu diperhatikan menurut Hardianti dkk. (2017) untuk memperoleh kecepatan pengeringan maksimum:

- Luas Permukaan

Semakin luas permukaan bahan maka akan semakin cepa bahan menjadi kering. Biasanya bahan yang akan dikeringkan dipotong-potong untuk mempercepat pengeringan, karena perlakuan tersebut menyebabkan permukaan bahan semakin luas.

- Suhu

Semakin besar perbedaan suhu antara medium pemanas dengan bahan akan semakin cepat proses perpindahan panas berangsung, sehingga mengakibatkan

proses pengeringan semakin cepat dan semakin tinggi suhu udara pengeringan semakin besar energi panas yang digunakan untuk melakukan proses perpindahan panas, sehingga perpindahan massa dan proses pengeringan berlangsung dengan cepat.

- Kecepatan udara

Udara bergerak dengan kecepatan tinggi berguna untuk mengambil uap air dari bahan yang dikeringkan. Selain itu, udara yang bergerak ini dapat mencegah terjadinya udara jenuh yang dapat memperlambat pengeringan.

- Kelembapan udara

Semakin lembab udara di dalam ruang pengering dan sekitarnya maka akan semakin lama proses pengeringan berlangsung, begitu juga sebaliknya. Karena udara kering dapat mengabsorpsi dan menahan uap air

- Tekanan pada keadaan atmosfer dan vakum

Pada tekanan udara atmosfer 1 atm, air akan mendidih pada suhu 100°C, sedangkan pada tekanan udara yang lebih rendah dari 1 atm, maka air akan mendidih pada suhu kurang dari 100°C

- Waktu

Semakin lama waktu pengeringan maka perpindahan massa air dari bahan yang dikeringkan ke udara pengering akan semakin banyak, sehingga bahan akan semakin kering.

2.1.2 Kadar Air

Kadar air atau moisture content adalah jumlah air yang terkandung dalam suatu bahan. Kadar air dari padatan bisa akan mengalami penurunan selama proses pengeringan berlangsung, yang kemudian akan menurunkan densitasnya. Pada beberapa kasus, bahan kering akan menyusut. Kadar air yang terkandung dalam bahan bisa dihitung dengan beberapa cara, diantaranya basis basah dan basis kering (Treyball, 1983).

Perhitungan basis basah :

$$X_{bb} = \frac{M_w - M_d}{M_w} \times 100\% \quad (2.1)$$

Perhitungan basis kering :

$$X_{bk} = \frac{M_w - M_d}{M_d} \times 100\% \quad (2.2)$$

Dimana :

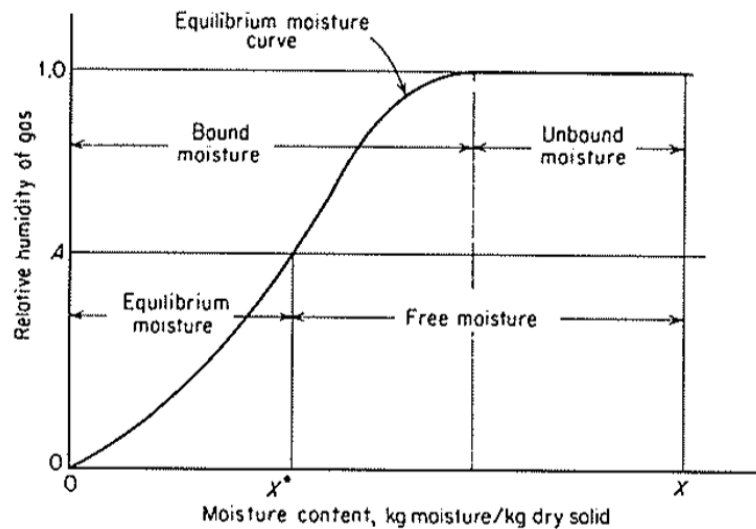
X_{bb} = Kadar air basis basah (%)

X_{bk} = Kadar air basis Kering (%)

M_w = Berat bahan basah (g)

M_d = Berat bahan kering (g)

Adapun jenis dari kadar air (moisture content) dapat dilihat dari gambar berikut :



Gambar 2.2 Jenis Kadar Air dalam Bahan

(Sumber: Treyball, 1983)

Keterangan :

1. Equilibrium Moisture (X^*) atau kadar air setimbang adalah keadaan dimana kadar air dari bahan setimbang dengan tekanan parsial uap air dalam udara.

2. Bound Moisture atau air terikat adalah keadaan dimana tekanan uap kadar air dalam bahan diantara tekanan uap air setimbang dan tekanan uap murni air pada temperatur yang sama.
3. Unbound Moisture atau Air tidak terikat adalah keadaan dimana tekanan uap air dalam bahan melebihi keadaan setimbangnya dan sama dengan tekanan uap murni air di temperatur yang sama.
4. Free Moisture atau Kadar air bebas adalah kadar air dalam bahan yang berlebih dari keadaan setimbangnya. Kadar air inilah yang bisa di uapkan dan kadar air bebas dari bahan padat tergantung dengan kelembapan udara.

2.1.3 Metode umum Pengeringan

Menurut C. J. Geankoplis(1993) Metode dan proses pengeringan dapat diklasifikasikan dalam berbagai cara yang berbeda. Proses pengeringan dapat dikelompokkan sebagai :

1. Pengeringan Batch adalah pengeringan dimana bahan yang dikeringkan dimasukkan ke dalam alat pengering dan didiamkan selama waktu yang ditentukan.
2. Pengeringan Continue adalah pengeringan dimana bahan basah masuk secara sinambung dan bahan kering keluar secara sinambung dari alat pengering.
Berdasarkan kondisi fisik yang digunakan untuk memberikan panas pada sistem dan memindahkan uap air, proses pengeringan dapat dibagi menjadi tiga, yaitu :
 3. Pengeringan kontak langsung
Menggunakan udara panas sebagai medium pengering pada tekanan atmosferik. Pada proses ini uap yang terbentuk terbawa oleh udara
 4. Pengeringan Vakum
Menggunakan logam sebagai medium pengontak panas atau menggunakan efek radiasi. Pada proses ini penguapan air berlangsung lebih cepat pada tekanan rendah

5. Pengeringan beku (freeze drying)

Pengeringan yang melibatkan proses sublimasi air dari material yang dibekukan dengan tekanan yang sangat rendah dan dihasilkan kualitas produk dari pengeringan yang tinggi. (Kunal A. Gaidhani, 2015)

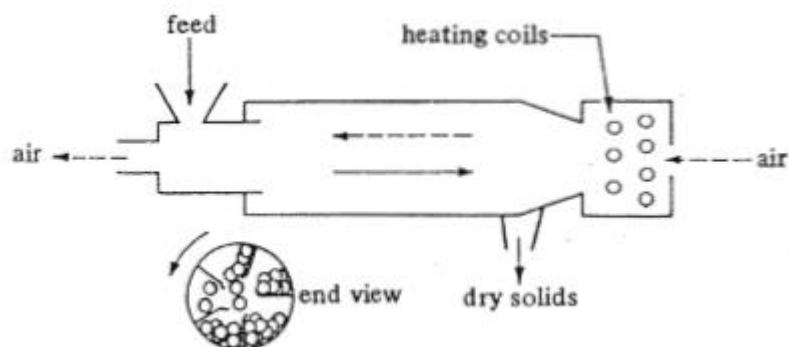
2.1.4 Jenis-jenis alat pengering

Berdasarkan bahan yang dikeringkan, jenis-jenis alat pengering terbagi menjadi:

2.1.4.1 Pengeringan untuk zat padat

a. Pengeringan putar (Rotary dryer)

Pengering putar terdiri dari sebuah selongsong berbentuk silinder yang berputar horisontal atau gerak miring ke bawah ke arah luar. Umpan masuk dari satu ujung silinder, bahan kering keluar dari ujung satu lagi.

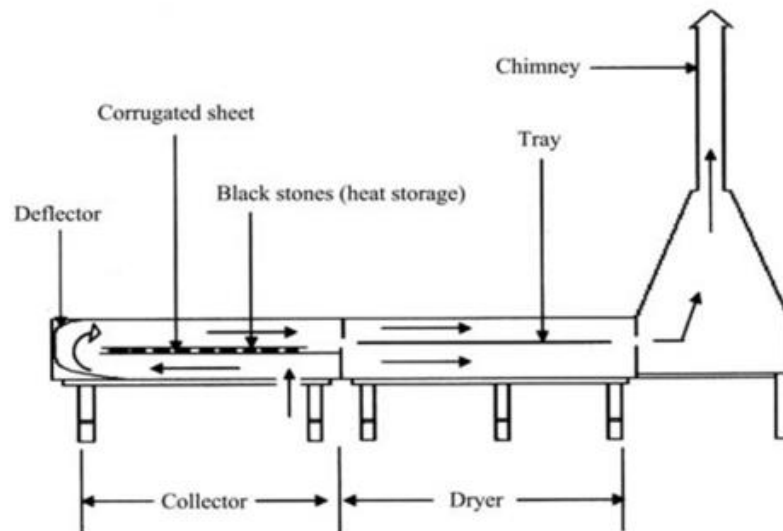


Gambar 2.3 Rotary dryer

(Sumber : Geankoplis, 1993)

b. Tunnel dryer

Bahan yang dikeringkan diangkat perlahan-lahan diatas logam atau belt, melalui kamar atau terowongan pengering yang mempunyai kipas dan pemanas.

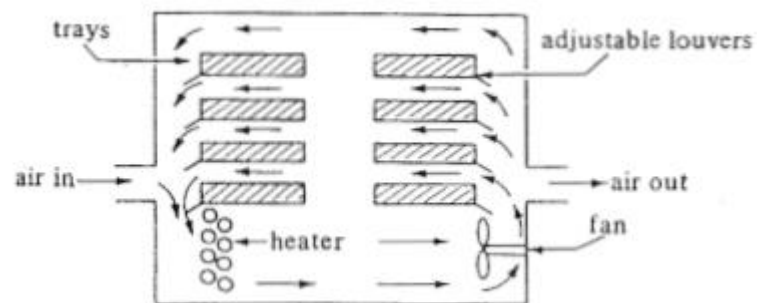


Gambar 2.4 Tunnel dryer

(Sumber : Geankoplis, 1993)

c. Tray dryer

Tray dryer mempunyai bentuk persegi dan didalamnya berisi rak-rak yang digunakan sebagai tempat bahan yang akan dikeringkan. Bahan diletakkan diatas rak (tray) yang terbuat dari logam yang berlubang, kegunaan lubang tersebut untuk mengalirkan udara panas.



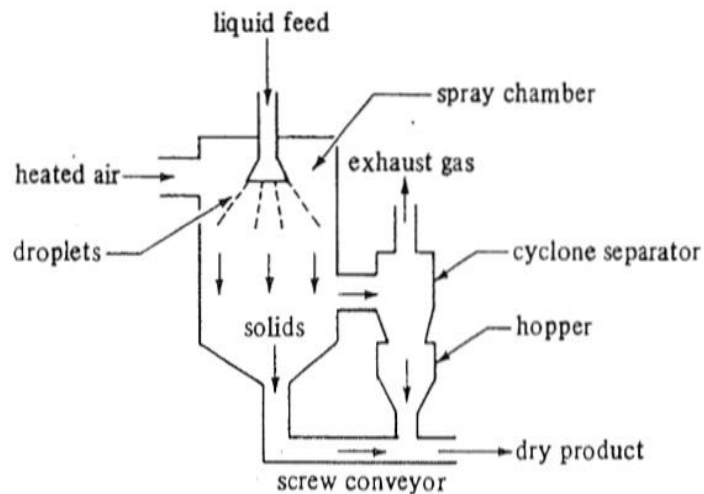
Gambar 2.5 Tray dryer

(Sumber : Geankoplis, 1993)

2.1.4.2 Jenis-jenis alat pengering larutan dan bubur

a. Spray dryer

Pada spray dryer bahan cair berpartikel kasar (slurry) dimasukkan lewat pipa saluran yang berputar dan disemprotkan ke dalam jalur yang kerudara bersih, kering dan panas dalam suatu tempat yang besar, kemudian produk yang telah kering dikumpulkan dalam filter kotak.

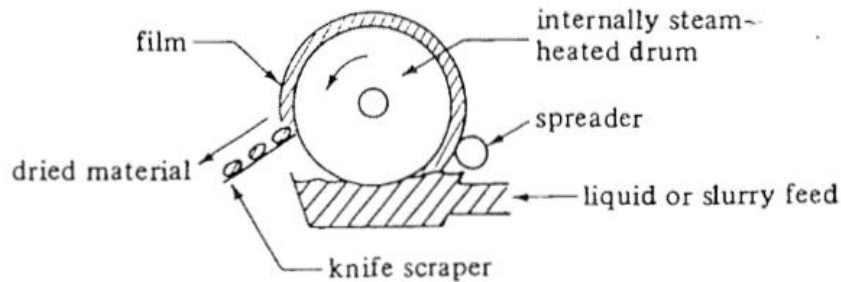


Gambar 2.6 Spray dryer

(Sumber : Geankoplis, 1993)

b. Drum dryer

Terdiri dari satu atau dua drum yang permukaannya licin dan dipanasi dengan steam didalamnya larutan yang cukup kental dikeringkan dengan cara membentuk lapisan tipis pada permukaan drum yang panas dan berputar perlahan.



Gambar 2.7 Drum Dryer

(Sumber : Geankoplis, 1993)

2.2 Dehumidifikasi

Dehumidifikasi adalah proses penurunan kadar uap air dalam udara. Udara yang kering dibutuhkan dalam industri khususnya industri makanan. Kegunaannya yaitu untuk pengawetan terkait jamur yang aktif pada kelembaban udara yang tinggi, pengiriman yang lebih murah karena berat air dari bahan yang dihilangkan, dan mempermudah proses pengolahan selanjutnya. Contohnya kelembaban relatif udara untuk penyimpanan gandum harus kurang dari 14%. Menurut Weilong Wang ada beberapa proses dehumidifikasi seperti proses dehumidifikasi dengan kondensasi, dengan pemanasan, Penggunaan membran, Penggunaan Dessicant cair, dan dehumidifikasi dengan adsorpsi uap air.

Dehumidifikasi dengan teknik adsorpsi dapat menurunkan Relative Humidity (RH) sampai sangat kecil dan tidak membutuhkan energi yang besar. Sehingga dapat digunakan dalam proses pengeringan untuk mengurangi kelembaban udara sampai sangat rendah sebelum dikontakkan dengan bahan yang akan dikeringkan sehingga air dalam bahan akan berpindah ke udara kering selama pengontakan.

Kecepatan dari air di permukaan bahan dapat diekspresikan dengan koefisien perpindahan massa fasa gas (k_y) dan perbedaan kelembaban udara dari gas pada permukaan bahan (Y^*) dan kelembaban udara dari udara pengering (Y). Maka persamaannya yaitu :

$$Nc = k_y(Y^* - Y) \quad (2.3)$$

2.3 Pengeringan Lapisan Tipis

Henderson dan Perry (1976) menyatakan bahwa pengeringan lapisan tipis adalah pengeringan dimana semua bahan yang terdapat dalam lapisan menerima secara langsung aliran udara dengan suhu dan kelembaban relatif yang konstan, dimana kadar air dan suhu bahan seragam.

Pengeringan lapisan tipis dimasukkan untuk mengeringkan produk sehingga pergerakan udara dapat melalui seluruh permukaan yang dikeringkan yang menghasilkan terjadinya penurunan kadar air dalam proses pengeringan. Atau dengan kata lain pengeringan lapisan tipis merupakan suatu pengeringan yang dilakukan dimana bahan dihamparkan dengan ketebalan satu tipis (satu) (Sodha et al.,1987). Karakteristik pengeringan ini dapat diinvestigasi dengan menggunakan model pengeringan yang efektif. Dalam hal ini, nilai Moisture Ratio (MR) memiliki peranan penting. Untuk nilai Moisture Ratio (MR) bahan selama pengeringan lapisan tipis, dikembangkan dengan pemodelan matematika seperti model newton, logarithmic, two-term model, midilli dan model page.

2.4 Model Matematika Proses Pengeringan

Model matematika proses pengeringan dengan berbagai kondisi operasi sangat berpengaruh untuk mendapatkan profil pengeringan sebagai pengendalian proses yang bertujuan meningkatkan kualitas produk. Beberapa model pengeringan digunakan untuk mempelajari pengaruh variabel-variabel yang digunakan dalam memprediksi kinetika pengeringan produk, mengoptimumkan parameter-parameter, dan proses kondisi operasi (Setyoprato, 2012).

2.4.1 Pembentukan model secara teoritis

Proses pengeringan secara teoritis dimodelkan dari dua model utama, yaitu

1. *Distributed models*

Distributed models didalamnya memperhitungkan perpindahan massa, perpindahan panas dan memprediksi gradien temperatur serta gradien kadar air dari bahan. Dimana model ini berasal dari persamaan Luikov yang berdasarkan persamaan hukum fick kedua tentang difusi yang ditunjukkan pada persamaan (2.4) dan persamaan modifikasinya (Luikov, 1975).

$$\begin{aligned}\frac{\partial M}{\partial t} &= \nabla^2 K_{11}M + \nabla^2 K_{12}T + \nabla^2 K_{13}P \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= \nabla^2 K_{21}M + \nabla^2 K_{22}T + \nabla^2 K_{23}P \\ \frac{\partial P}{\partial t} &= \nabla^2 K_{31}M + \nabla^2 K_{32}T + \nabla^2 K_{33}P\end{aligned}\quad (2.4)$$

Dimana, K_{11} , K_{22} , K_{33} adalah *phenomenological coefficients*, dan K_{12} , K_{13} , K_{21} , K_{23} , K_{31} , K_{32} adalah *coupling coefficients* (Brooker et al., 1974).

Pada kebanyakan proses, efek dari tekanan dapat diabaikan dibanding efek dari temperatur dan kadar air, jadi persamaan Luikov menjadi (Brooker et al., 1974):

$$\begin{aligned}\frac{\partial M}{\partial t} &= \nabla^2 K_{11}M + \nabla^2 K_{12}T \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= \nabla^2 K_{21}M + \nabla^2 K_{22}T\end{aligned}\quad (2.5)$$

Namun, persamaan dari Luikov diatas mungkin tidak dapat diselesaikan secara analitik karena kesulitan dan kompleksnya proses pengeringan sebenarnya.

2. *Lumped parameter models*

Pada *Lumped parameter models* didalamnya tidak termasuk gradien temperatur pada bahan karena diasumsikan keseragaman temperatur pada bahan dengan temperatur udara pengering. Sehingga persamaan Luikov menjadi:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11}M$$

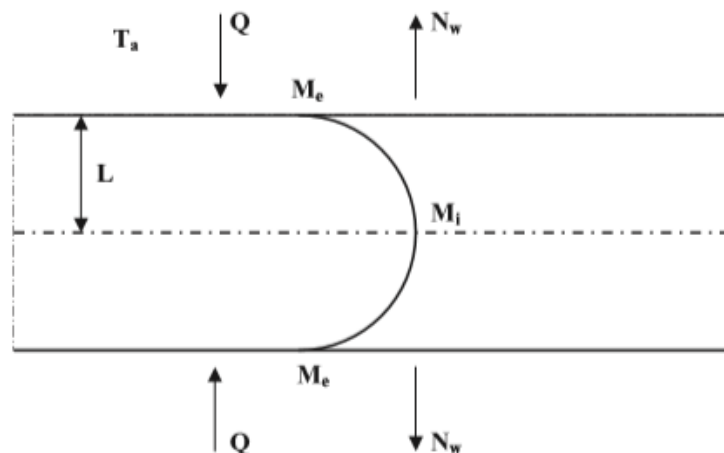
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 K_{22} T \quad (2.6)$$

Phenomenological coefficients (K_{11}) ini adalah difusivitas uap air efektif (D_{eff}) dan K_{22} diketahui sebagai difusitas termal (α). Dengan asumsi nilai D_{eff} dan α , maka persamaan menjadi :

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} &= D_{eff} \left[\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{a_1}{x} \frac{\partial M}{\partial x} \right] \\ \frac{\partial M}{\partial t} &= \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{a_1}{x} \frac{\partial T}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (2.7)$$

Dimana, parameter $a_1 = 0$ untuk *planar geometries* (permukaan 2 dimensi), $a_1 = 1$ untuk bentuk silinder dan $a_1 = 2$ untuk bentuk bola (Ekechukwu, 1999).

Dengan asumsi menyamakan distribusi temperatur dengan udara sekitar bahan makan akan menghasilkan nilai error. Nilai error ini hanya terjadi pada awal proses dan dapat dikurangi sampai ke nilai yang dapat diterima dengan cara mengurangi ketebalan dari bahan (Henderson dan Pabis, 1961). Dengan ini, persamaan lapis tipis dapat diturunkan.



Gambar 2.8 Gambar skematik dari pengeringan lapis tipis, jika pengeringan terjadi dari dua arah

(Sumber: Zafer dan Icier, 2010)

Diasumsikan kondisi isothermal hanya berubah oleh waktu, maka persamaan (2.7) dapat menjelaskan perpindahan massa (Whitaker *et al.*, 1969; Young, 1969). Sehingga persamaan (2.7) dapat di selesaikan secara analitis dengan kondisi awal dan kondisi batas dari gambar (2.8) sebagai berikut:

$$t = 0, \quad -L \leq x \leq L, \quad M = M_i \quad (2.8)$$

$$t > 0, \quad x = 0, \quad \frac{dM}{dx} = 0 \quad (2.9)$$

$$t > 0, \quad x = L, \quad M = M_e \quad (2.10)$$

$$t > 0, \quad -L \leq x \leq L, \quad T = T_a \quad (2.11)$$

Asumsi:

- a. Partikel homogen dan isotropi
- b. Karakteristik dari material konstan, dan pengngkerutan dari bahan diabaikan
- c. Variasi tekanan di abaikan
- d. Penguapan hanya terjadi di permukaan
- e. Distribusi kadar air awal dianggap sama (Persamaan 2.8) dan selama proses tetap simetris (Persamaan 2.9)
- f. Ketika difusi pada permukaan selesai, kadar air kesetimbangan terjadi pada permukaan (Persamaan 2.10)
- g. Seragamnya distribusi temperatur sama dengan suhu udara pengering disekitar bahan, atau dinamakan *lumped system* (Persamaan 2.11)
- h. Perpindahan panas terjadi secara konduksi didalam bahan dan konveksi diluar bahan
- i. Diffusivitas uap air efektif vs kadar air selalu konstan selama pengeringan

Sehingga solusi analitis dari persamaan (2.7) adalah sebagai berikut untuk lapis tipis atau bola

$$MR = A_1 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp\left(-\frac{(2i+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{A_2}\right) \quad (2.12)$$

Tabel 2.1 Nilai konstanta geometri berdasarkan bentuk dari bahan

Geometri bahan	A ₁	A ₂
Lapis tipis 2-dimensi	$8/\pi^2$	$4L^2$
Bola	$6/\pi^2$	$4r^2$
Lapis tipis 3-dimensi	$(8/\pi^2)^3$	$\frac{1}{(L_1^2+L_2^2+L_3^2)}$

(Sumber: Zafer dan Icier, 2010)

Dengan mensubstitusi nilai konstanta geometri dari bahan di dapatkan persamaan:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (2.13)$$

Untuk waktu pengeringan yang panjang, persamaan (2.14) dapat disederhanakan, Dengan hanya mengambil deret pertama ($i = 1$) dari rangkaian deret persamaan sehingga dapat digunakan dengan nilai error yang kecil atau yang disebut solusi Crank. Maka persamaan menjadi:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (2.14)$$

2.4.2 Pembentukan model secara semi-teoritis

Model Semi-teoritis dapat diklasifikasi menjadi 2, yaitu:

1. Hukum pendinginan newton

Berikut ini merupakan model usulan dari peneliti untuk model semi-teoritis yang diturunkan dari analogi hukum pendinginan newton.

a. Model newton

Lewin (1921) mengatakan selama pengeringan proses pengeringan dari bahan higroskopis yang kasar, perubahan kadar air dari bahan saat “*falling rate peroid*” itu proposional ke perbedaan antara kadar air dengan kadar air perkiraan ketika setimbang dengan udara pengering. Jadi konsep ini berlaku dengan mengasumsikan bahan cukup tipis, laju udara yang tinggi, dan kondisi dari udara pengering mempunyai *relative humidity* dan temperaturnya tetap

konstan.

$$\frac{dM}{dt} = -K(M - M_e) \quad (2.15)$$

Dimana, K adalah konstanta pengeringan (s^{-1}). Pada konsep pengeringan lapis tipis, konstanta pengeringan merupakan kombinasi fenomena dalam pengeringan seperti difusivitas kadar air, konduktivitas termal, perpindahan panas dan massa (Marinos Kouris and Maroulis, 1995). Dan persamaan dapat di tulis kembali sebagai:

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = \exp(-kt) \quad (2.16)$$

Dimana, k adalah konstanta pengeringan (s^{-1}) yang didapat dari data eksperimen.

b. Model Page

Page (1949) memodifikasi model Lewis untuk mendapatkan model yang lebih akurat dengan menambahkan konstanta empiris tak berdimensi (n) dan diaplikasikan untuk pemodelan matematika dari pengeringan jagung:

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = \exp(-kt^n) \quad (2.17)$$

2. Model diturunkan dari hukum difusi Fick kedua

Berikut ini merupakan usulan dari peneliti untuk model semi-teoritis yang diturunkan dari hukum diffusi Fick kedua yaitu:

a. Logaritmic model

Chandra and Singh (1995) mengusulkan model baru termasuk model logaritmic dari model Henderson dan Pabis dengan tambahan konstanta empiris, dan model ini diaplikasikan untuk mengeringkan daun laurel. Dimana persamaan dari Crank ditulis ulang dengan asumsi D_{eff} konstan sehingga didapatkan persamaan Henderson dan Pabis sebagai berikut:

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = a \exp(-kt) \quad (2.18)$$

Pada model Logaritmic persamaan ditambahkan c yang berupa konstanta empiris (tak berdimensi) menjadi:

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = a \exp(-kt) + c \quad (2.19)$$

b. Model Midilli

Midilli *et al.* (2002) mengusulkan model baru dengan penambahan konstanta empiris baru yang diikuti t ke dalam model Henderson dan Pabis. Model ini adalah kombinasi persamaan eksponensial dan persamaan linear.

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = a \exp(-kt) + bt \quad (2.20)$$

c. Model Two-term

Henderson (1974) mengusulkan menggunakan dua deret pertama dari persamaan hukum Fick kedua tentang difusi (Persamaan 3.15) untuk mengoreksi dari model Henderson dan Pabis. Lalu model ini digunakan untuk mengeringkan gandum. Model diturunkan menjadi:

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t) \quad (2.21)$$

Dimana, a , b adalah konstanta model (tak berdimensi) dan k_1 dan k_2 adalah konstanta pengeringan (s^{-1}). Konstanta ini didapatkan dari data eksperimen.

2.4.3 Hasil Studi Pemodelan Matematika Thin Layer Drying Untuk Menentukan Tipe Model Yang Efektif Digunakan

Adapun beberapa data hasil yang diperoleh mengenai bahan yang dikeringkan dengan berbagai model Thin Layer Drying. Dapat dilihat untuk bahan yang berbeda- beda model yang efektif yang dapat digunakan sebagai berikut:

Tabel 2.2 Model Yang Efektif Digunakan Pada Bahan Yang Akan Dikeringkan

Bahan	Kondisi (°C)	Model yang cocok atau efektif digunakan	Referensi
Apel	60-80	midilli	(Akpinar,2006)
Apricot	47,3-61,74	Midilli	(Akpinar,2006)
Apricot	50-80	logarithmic	(togrul dan pehlivan, 2003)
Anggur(sultana)	32,4-40,3	Two-term	(yaldiz, 2001)
Kemiri	100-160	Two-term	(ozdemirand devres,200)
Kacang Hijau	50-80	page	(yaldiz dan ertekin, 2001)
Padi	70-150	newton	(Rao,2007)
Peterseli	56-93	page	(akpinar, 2006)
Persik (Peace)	55-65	logarithmic	(kingsley,2007)
Pistachio	40-60	midilli	(middy, 2006)
Cabai Merah	40-65	newton	(Hossain,2007)

2.5 Metode Analisa Model

Analisa statistik dari data dilakukan dengan metode Regresi Non-linier berdasarkan algoritma Ivenberg-marquart digunakan untuk memprediksi parameter sehingga dapat ditentukan model yang terbaik. Metode ini dibantu oleh software Microsoft Excel Solver. Dalam penentuan model yang paling cocok digunakan beberapa parameter seperti *Coefficient of determation* (R^2) dan *Sum square error* (SSE) dimana model yang paling cocok dinyatakan dengan nilai R^2 paling mendekati nilai 1 dan nilai SSE paling mendekati nilai 0 (Gotya *et al.* 2006). Parameter ini ditentukan dari persamaan berikut:

$$R^2 = \frac{1 - \left[\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]}{\left[\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]} \quad (2.22)$$

$$SSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N} \right] \quad (2.23)$$

Dimana

$MR_{exp,i}$ = MR eksperimen pada waktu i

$MR_{pre,i}$ = MR prediksi pada waktu i

N = Jumlah sampel

2.6 Perpindahan Panas Pada Proses Pengeringan

Pada proses pengeringan terjadi perpindahan massa disertai dengan perpindahan panas. Perpindahan panas merupakan berpindahnya energi dan suatu titik ke titik lainnya karena ada perbedaan suhu. Perpindahan panas terjadi karena antara gas panas dengan bahan yang akan dikeringkan. Pengeringan bahan dapat dilakukan dengan terus memanaskan sampai diatas titik didih zat cair, misalnya dengan mengontakkan zat padat tersebut dengan uap yang sangat panas, sebagian besar pengeringan dirancang hanya atas dasar perubahan kalor saja.

Pengeringan suatu bahan terjadi berdasarkan definisi proses termal. Walaupun terkadang dipersulit dengan difusi dalam padatan, merupakan suatu hal yang memungkinkan untuk mengeringkan banyak material hanya dengan dipanaskan diatas titik didih cairan. Padatan basah, dapat dikeringkan dengan dipaparkan pada *highly superheated steam*. Ketika tidak terjadi difusi, satu-satunya masalah ialah perpindahan panas. Pada pengeringan adiabatik, difusi selalu terjadi, tetapi laju pengeringan sering dibatasi oleh perpindahan panas, bukan perpindahan massa. Dalam suatu alat pengeringan, panas yang diberikan harus dapat memenuhi keperluan untuk :

1. Memanaskan umpan hingga temperatur penguapan
2. Menguapkan cairan
3. Memanaskan padatan hingga temperatur akhirnya

4. Memanaskan uap hingga temperatur akhirnya

Secara umum, laju perpindahan panas dapat dinyatakan dengan,

$$\frac{qT}{\dot{m}_s} = C_{p_c}(T_{sb} - T_{ca}) + x_a C_{p_L}(T_v - T_{sa}) + (x_a - x_b)\lambda + x_b C_{p_L}(T_{sb} - T_v) + (x_a - x_b)C_{p_v}(T_{va} - T_v) \quad (2.24)$$

Dimana:

\dot{m}_s = Massa padatan yang dikeringkan per waktu

x_a, x_b = Kadar air awal dan akhir

T_{sa} = Temperatur umpan

T_v = Temperatur penguapan

T_{sb} = Temperatur akhir padatan

T_{va} = Temperatur akhir uap

λ = Panas penguapan

$C_{p_c}, C_{p_L}, C_{p_v}$ = Kapasitas panas padatan, cairan dan uap

(McCabe, 1993)

2.7 Perpindahan Massa Pada Pengeringan

Perpindahan yang terjadi selama proses pengeringan adalah proses perpindahan panas yang mengakibatkan menguapnya air dari dalam bahan yang akan dikeringkan dan proses perpindahan massa dimana sejumlah uap air dari dalam bahan yang akan dikeringkan ke udara.

Fluida panas melewati suatu bahan yang dapat menyebabkan massa ditransfer dari suatu permukaan bahan ke fluida panas melalui saluran interior penyangin. Laju alir massa penguapan (\dot{m}_v) dapat dihitung melalui hubungan persamaan

$$(\dot{m}_v) = (\dot{m}_s) (x_a - x_b) \quad (2.25)$$

Keterangan :

\dot{m}_v = laju alir massa penguapan

\dot{m}_s = laju alir massa solid

x_a = kadar air total awal

x_b = kadar air total akhir

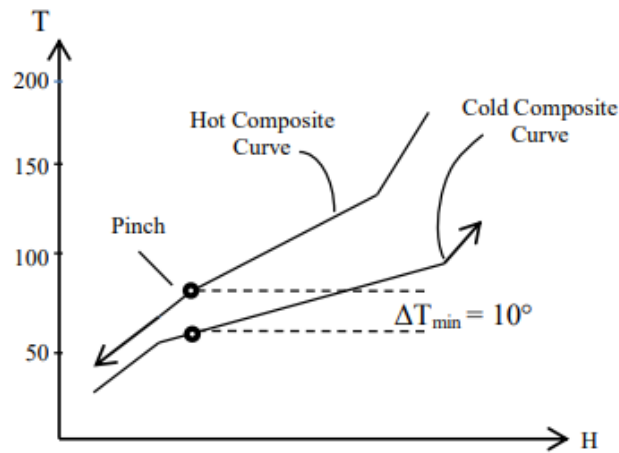
Jika pada awalnya padatan sangat bersih maka permukaan akan ditutupi lapisan cairan yang diasumsikan sepenuhnya air terikat. Laju dimana air menguap dapat digambarkan dalam koefisien perpindahan massa (k_y) dan perubahan kelembapan maksimum (y') dan kadar air udara (y)

$$Nc = k_y (y' - y) \quad (2.26)$$

(Mc Cabe, 1993)

2.8 Analisis Pinch

Pinch technology merupakan metodologi analisis energi berbasis hukum pertama termodinamika. *Pinch technology* dikenalkan oleh Linnhoff (1998) untuk menghemat pemakaian energi dalam unit proses. *Pinch technology* adalah teknik integrasi panas yang membutuhkan penyusunan plot suhu terhadap panas yang ditransfer dalam suatu sistem. Aliran fluida panas (fluida yang akan didinginkan) dan aliran fluida dingin (fluida yang akan dipanaskan) dari suatu sistem. Teknik ini digambarkan dalam *composite curve* yang berisi dua kurva yang terpisah. Istilah *pinch* didapat dari penyempitan kedua kurva yang ada dalam grafik sebagaimana ditunjukkan di Gambar berikut.



Gambar 2.9 Composite curve untuk analisis pinch
(Sumber: Linnhoff, 1998)

Pada pembuatan kurva komposit untuk masing-masing aliran, sebuah grafik dalam fungsi temperatur-enthalpi (T-H grafik) dapat mewakili aliran-aliran tersebut, adapun syarat yang diperlukan oleh masing-masing aliran adalah temperatur sumber dan temperatur sasaran serta massa aliran harus diketahui. Pada **Gambar 2.9** grafik dengan arah panah kebawah adalah aliran panas sedangkan grafik dengan arah panah keatas adalah aliran dingin, pinch terlihat pada daerah dimana grafik antara aliran panas dan dingin berada pada bagian yang terdekat antara satu dengan yang lain. Pada daerah pinch ini berbeda temperatur antara aliran panas dan aliran dingin dinamakan dengan ΔT_{\min} . Dengan kurva komposit ini maka dapat digambarkan besarnya kualitas panas yang dapat dipertukarkan dengan kualitas kebutuhan minimum utilitas panas (memerlukan panas) dan utilitas dingin (memerlukan dingin). Jadi dengan analisis pinch memberikan kemudahan dalam menentukan target konsumsi energi minimum dengan basis neraca massa dan neraca panas.

2.9 Kentang

Kentang (*Solanum tuberosum L.*) merupakan salah satu jenis umbi-umbian yang bergizi. Zat gizi yang terdapat dalam kentang antara lain karbohidrat, mineral (besi, fosfor, magnesium, natrium, kalsium, dan kalium), protein, serta vitamin terutama vitamin C dan B1. Selain itu, kentang juga mengandung lemak dalam jumlah yang relatif kecil, yaitu 1.0 – 1.5% (Prayudi, 1987).

Selain dikonsumsi dalam keadaan segar, dewasa ini kentang juga dimanfaatkan menjadi berbagai hasil industri makanan olahan. Kentang memiliki kadar air cukup tinggi, yaitu sekitar 75 - 85%. Hal itu yang menyebabkan kentang segar mudah rusak. Secara umum, hasil olahan kentang dapat berupa tepung, kentang kering, kentang beku, dan keripik kentang. French fries merupakan produk olahan yang semakin populer dalam pola konsumsi masyarakat Indonesia (Wattimena, 2006)



Gambar 2.10 Kentang (*Solanum tuberosum L.*)

(Sumber: Wikipedia)

2.10 Silika Gel

Silika gel sudah banyak digunakan sebagai desiccant pada industri makanan yang mana harganya murah dan tetap efektif. Silika gel diproduksi dalam bentuk seperti granulan berbentuk bulat, transparan dan struktur yang kering. Jumlah rongga pori-pori mikro dalam silika gel meningkatkan kapasitas dalam menyerap uap air dari udara. Uap air yang terjebak dapat dihilangkan dengan cara pemanasan.

Dasarnya tidak ada reaksi kimia yang terjadi di silika gel saat menyerap uap air melainkan penyerapannya uap air ke dalam celah dalam pori-pori mikro dalam silika gel. Hal ini terjadi karena adanya gradien uap air yang di lingkungan dan di dalam celah

atau pori-pori silika gel. Oleh karena itu, penyerapan air akan terus terjadi sampai silika gel jenuh atau tekanan uap air dari lingkungan dengan tekanan uap air pada celah mikro dalam silika gel mencapai keadaan setimbang. Setelah silika gel mencapai kapasitas maksimum dalam menyerap air, silika gel tidak berubah bentuk dan tetap kering.

(A. M. Suweesha. 2017)