

BAB II

DASAR TEORI

Bab ini akan menjelaskan beberapa dasar teori yang akan digunakan penulis untuk melakukan perhitungan, analisa dan kesimpulan. Sebagian dasar teori yang dijelaskan akan benar-benar terpakai dalam perhitungan, ataupun analisa, tetapi dasar teori yang lain digunakan karena mempunyai keterkaitan dengan pokok masalah yang akan dijelaskan oleh penulis. Beberapa dasar teori yang akan dijelaskan adalah dasar pengeringan, teori psikrometri, diffusivitas, konstanta dielektrik, gelombang elektromagnetik, dll. Selengkapny dbahas di bawah ini.

2.1 PENDAHULUAN

Pengeringan adalah kegiatan mengubah suatu material berbentuk padatan, semi-padatan, ataupun cairan menjadi produk berbentuk padatan melalui penguapan cairan didalamnya ke fase uap dengan penambahan panas. Pada kasus khusus seperti pada pengeringan beku, yang berlangsung pada titik tripel cairan yang akan dikeluarkan, pengeringan terjadi dengan penyubliman fase padat langsung ke fase cairan. Jadi, definisi ini tidak mencakup perubahan suatu fase cair menjadi fase cair yang terkonsentrasi (penguapan), operasi pengurangan air secara mekanis seperti penyaringan, sentrifugasi, sedimentasi, ekstraksi superkritik air dari jel untuk menghasilkan *aerojel* yang sangat berongga (ekstraksi), atau yang disebut sebagai pengeringan cairan dan gas dengan menggunakan saringan molekular (adsorpsi). Perubahan fase dan pembentukan fase padat sebagai hasil akhir adalah ciri penting dari pengeringan.

Pengeringan mungkin merupakan satuan operasi teknik kimia yang paling tua dan paling tersebar. Lebih dari 400 jenis pengering telah dilaporkan pada referensi, dan sebagian dari padanya telah tersedia di pasar umum.

Pengeringan berbagai material diperlukan untuk memenuhi beberapa kebutuhan seperti :

- Kebutuhan untuk mempermudah penanganan material padatan yang dapat mengalir bebas.
- Pengawetan dan penyimpanan.
- Mendapatkan mutu hasil yang diinginkan.
- Mempermudah transportasi karena volume bahan mengecil.

2.2 PENGERINGAN

Pengeringan adalah suatu operasi ilmiah yang meliputi perpindahan panas dan massa secara transien serta beberapa laju proses, seperti transformasi fisik atau kimia yang pada gilirannya dapat menyebabkan perubahan mutu hasil maupun mekanisme perpindahan panas dan massa [2]. Perubahan fisik yang mungkin terjadi meliputi : pengkerutan, penggumpalan, kristalisasi, transisi gelas. Pada beberapa kasus dapat terjadi reaksi kimia ataupun biokimia yang diinginkan ataupun yang tidak diinginkan, yang dapat menyebabkan perubahan warna, tekstur, aroma, ataupun sifat lain padatan yang dihasilkan.

Pengeringan terjadi melalui penguapan cairan dengan pemberian panas ke bahan material panas. Panas dapat disediakan melalui pengering konveksi (pengering langsung), pengering konduksi (pengering sentuh), radiasi ataupun secara volumetrik menempatkan bahan material tersebut dalam medan gelombang elektromagnetik mikro (*microwave*), ataupun gelombang radio. Seluruh cara pengeringan, kecuali dielektrik (gelombang mikro atau frekuensi radio), menyediakan panas pada batas objek yang dikeringkan sehingga panas harus berdifusi kedalam peralatan melalui proses konduksi.

Saat sebuah material padat basah dikenai pengeringan termal ada 2 proses timbul secara bersamaan :

1. Transfer ataupun perpindahan energi (biasanya panas) dari lingkungan sekitar untuk menguapkan kelembapan permukaan .
2. Perpindahan kelembapan internal ke arah permukaan padatan dan penguapan lanjutan karena proses pertama tadi.

Pergerakan air dalam material padatan dapat terjadi melalui salah satu atau lebih dari mekanisme perpindahan massa berikut :

- Difusi cairan, jika padatan basah berada pada suhu dibawah titik didih cairan tersebut.
- Difusi uap, jika cairan menguap dalam bahan.
- Difusi Knudsen, jika pengeringan dilakukan pada tekanan dan suhu yang sangat rendah.
- Difusi permukaan.
- Beda tekanan hidrostatik, jika laju penguapan internal melampaui laju pergerakan uap melalui padatan ke lingkungan sekitar.
- Kombinasi dari mekanisme diatas.

Secara umum, pengeringan konvensional dapat berlangsung dalam dua tahapan [2] :

Proses 1, Pemindahan air dari permukaan material menjadi uap.

Proses ini tergantung pada kondisi di luar material seperti temperatur, humiditas udara dan kecepatan aliran udara, luas area permukaan, dan tekanan. Dan proses ini juga akan bergantung pada sifat-sifat air.

Proses 2, Pemindahan/penghilangan kelembapan dari bagian dalam padatan.

Proses ini merupakan fungsi dari karakteristik fisik dari padatan, temperatur, dan tingkat kelembapan padatan.

Pada proses pengeringan kedua proses ini merupakan faktor pengatur tingkat pengeringan, walaupun kedua proses itu selalu timbul dalam sebuah siklus pengeringan.

2.2.1 Faktor Eksternal

Faktor eksternal berpengaruh saat benda padatan masih ditutupi oleh lapisan air bebas (air yang tidak terikat pada padatan) di permukaannya. Pada kondisi ini variable eksternal yang paling penting antara lain adalah humiditas, temperatur, laju dan arah aliran, bentuk fisik dari padatan dan agitasi yang diinginkan.

Kondisi pengeringan eksternal adalah termasuk yang paling penting pada permulaan dari proses pengeringan., saat kelembapan yang tidak terikat dihilangkan. Pada beberapa contoh kasus, contohnya pada material seperti kayu

dan keramik, dimana perlu diperhatikan munculnya penguapan, penyusutan yang berlebihan pada permukaan setelah kelembapan awal dipindahkan yang akan menciptakan gradien kelembapan yang tinggi antara bagian dalam material dengan permukaannya. Hal ini akan menyebabkan pengeringan yang berlebihan dan penyusutan yang berlebihan, sehingga dapat menimbulkan tegangan yang tinggi dalam material tersebut, yang menimbulkan keretakan dan pelipatan [2]. Pada kasus ini, perlu adanya pengurangan laju pengeringan dengan menggunakan aliran udara yang mempunyai kelembapan relatif yang tinggi, sementara itu juga menjaga laju pengeringan aman yang tertinggi dari pergerakan kandungan kelembapan internal karena perpindahan panas.

Penguapan pada permukaan tergantung dari difusi uap dari permukaan padatan ke lingkungan sekitar, yang melewati lapisan tipis udara yang bersentuhan dengan permukaan. Karena pengeringan pada tahap ini berhubungan dengan perpindahan massa saat sebuah gas dibawa bersentuhan dengan cairan yang tentu saja tidak terlarut, hal yang penting untuk diingat adalah karakteristik kesetimbangan dari padatan basah. Juga karena perpindahan massa itu biasanya bersamaan dengan perpindahan panas, perlu diingat juga pertimbangan tentang karakteristik entalpi.

2.2.2 Faktor Internal

Setelah pengeringan tahap 1 telah selesai maka, air bebas dipermukaan padatan sudah habis dikeringkan dan terjadi perbedaan kelembapan yang tinggi antara permukaan padatan dan bagian dalam padatan yang masih basah. Selain itu juga terjadi perbedaan temperatur antara medium yang basah dengan medium yang kering, sehingga gradien temperatur terjadi pada medium. Hal ini menyebabkan perpindahan kelembapan air dalam ke permukaan, yang berjalan dengan cara difusi, gaya kapiler, tekanan internal karena penyusutan selama pengeringan [2].

2.2.2.1 Kadar Kelembapan dari Suatu Bahan

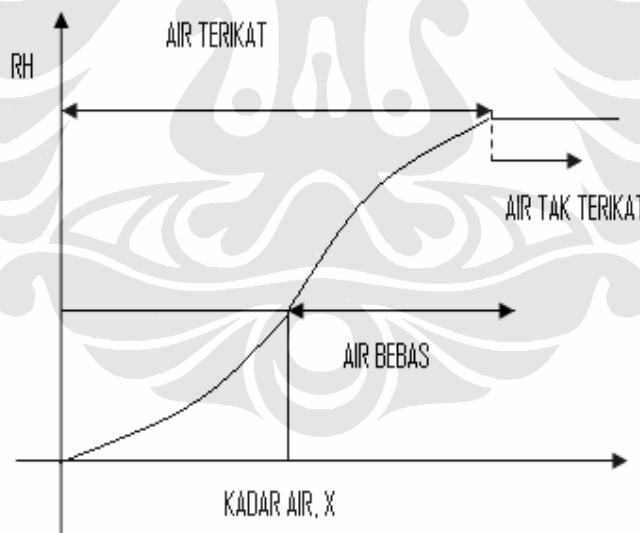
Kadar kelembapan suatu bahan padatan basah mendesak tekanan uap sampai pada suatu tingkat tertentu tergantung dari sifat kelembapan, sifat padatan dan temperatur. Suatu padatan basah yang terkena aliran gas/udara akan terus menerus kehilangan kelembapannya sampai dengan tekanan uap dari kelembapan dalam padatan sama dengan tekanan parsial dari uap pada gas/udara tersebut. Padatan dan gas tersebut bisa dianggap berada dalam kesetimbangan, dan kandungan kelembapan dalam padatan disebut kesetimbangan kandungan kelembapan pada kondisi yang berlaku. Setelah saat ini, maka pengaruh dari aliran udara tidak akan ada terhadap pengurangan kelembapan dari padatan tersebut. Kelembapan padat itu dapat dikurangi dengan cara mengalirkan udara/gas dengan humiditas yang lebih rendah. Suatu padatan dapat diklasifikasi sebagai berikut [2] :

1. Medium nonhigroskopik berpori dan berkapiler, seperti pasir mineral lebur, kristal nonhigroskopik partikel polimer, dan beberapa keramik. Kriteria bahan ini adalah sebagai berikut :
 - a. Ada pori-pori yang terlihat jelas, pori-pori berisi cairan jika medium tersebut berada dalam keadaan saturasi, dan akan berisi gas/udara jika dalam keadaan kering.
 - b. Jumlah kelembapan terikat secara fisik diabaikan, karena bendanya nonhigroskopik.
 - c. Medium tidak menyusut selama dikeringkan.
2. Medium higroskopik berpori, seperti tanah liat, saringan molekuler, kayu dan bahan tekstil. Kriteria bahan ini adalah sebagai berikut :
 - a. Terdapat pori-pori yang terlihat jelas.
 - b. Terdapat dalam jumlah besar cairan terikat secara fisik.
 - c. Adanya penyusutan pada kondisi awal pengeringan.
3. Medium koloidal (tidak berpori) seperti sabun, lem beberapa polimer (contohnya nilon), dan beberapa produk makanan. Kriteria bahan ini :
 - a. Tidak ada pori-pori (penguapan hanya terjadi pada permukaan saja).
 - b. Semua cairannya terikat secara fisik.

Mujumdar menjelaskan bahwa, karena volume dari suatu benda akan berubah selama proses pengeringan, maka kelembapan tidak bisa dirumuskan dalam bentuk volume. Kandungan kelembapan suatu produk biasanya dinyatakan dalam bentuk kandungan kelembapan perberat kering dari padatan.

Air dapat berada dalam keadaan terikat didalam padatan oleh karena ketahanan kaplier, karena solusi dalam struktur seluler, karena solusi dalam padatan, atau karena adsorpsi kimia dan fisika pada permukaan padatan. Pada dasarnya terdapat dua jenis kelembapan pada padatan yaitu :

- ❖ Kelembapan tak terikat pada sebuah material higroskopis adalah kelembapan berlebih yang berada pada keadaan kesetimbangan antara kelembapan dan humiditas saturasi [2]. Suatu kandungan kelembapan dalam medium nonhigroskopis adalah kelembapan tak terikat.
- ❖ Kandungan kelembapan bebas adalah kandungan kelembapan yang bisa dipindahkan pada setiap temperatur dan terdiri dari kelembapan terikat dan tidak terikat.



Gambar 2.1. Grafik Kelembapan relative terhadap kadar air.

Sumber : Devashatin,S., 2001. *Mujumdar's Practical Guide To Industrial Drying. Panduan Praktis Mujumdar Untuk Pengeringan Industrial. Terjemahan Oleh : A.H. Tambunan, D.Wulandari, E. Hartulistiyoso dan L.O.Nelwan. IPB Press, Bogor.*

2.2.2.2 Difusivitas

Difusivitas uap air adalah salah satu sifat yang penting dan dibutuhkan dalam perhitungan serta pemodelan pengeringan makanan. Uap air adsorption atau desorption selama penyimpanan maupun pada saat rehydration. Difusi menyebar ke seluruh material menuju ke lingkungan. Difusi yang terjadi dari komponen A ke medium B terjadi karena perbedaan konsentrasi A dalam arah y. Fenomena ini biasa disebut dengan ordinary diffusion (difusi alami). Fluks massa (J_{AB}) difusi dapat di perkirakan dengan menggunakan hukum pertama Fick's diffusion sebagai berikut :

$$J_{AB} = -D_{AB} \frac{dc_A}{dy} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana :

$$J_{AB} = \text{rate difusi molekul, kmol / (m}^2 \text{ s)}$$

$$D_{AB} = \text{koefisien difusi, m}^2 \text{ / s}$$

$$\frac{dc_A}{dy} = \text{perbedaan konsentrasi A, } \frac{\text{kmol / m}^3}{\text{m}}$$

Perbandingan yang konstan didefinisikan sebagai *difusivitas* (D_{AB}) dan dalam satuan m^2/s . Dua tipe umum difusi adalah difusi molecular dan difusi eddy. Difusi molekular dapat didefinisikan sebagai transport atau perpindahan dari material pada sebuah skala molekular melewati fluida yang tidak mengalir dalam sebuah arah yang tegak lurus terhadap aliran utama. Sebaliknya, difusi eddy lebih dikonsentrasikan pada transfer masa melibatkan aliran turbulen dalam fluida.

Prediksi yang akurat dari difusi uap air dapat membawa kita pada pengeringan yang optimal dengan menggunakan model komputer yang cukup rumit. Karena prediksi secara teori dari difusi uap air dalam material makanan yang kompleks sangat sulit., banyak dari pekerjaan dibatasi pada estimasi percobaan dari difusi uap air. Walaupun data difusi uap air efektif dari berbagai macam material makanan tersedia dalam literature, dalam banyak kasus data yang dilaporkan adalah sebagai sebuah fungsi kandungan uap air dan temperatur. Dibatasinya informasi yang disediakan seperti porositas, jenis dari medium, dan

struktur yang mempengaruhi difusi. Dengan metode analitik dan metode numerik yang luas digunakan dalam mengestimasi atau memperkirakan difusi uap air.

Efektivitas dari difusi uap air

Operasi dari aliran massa dilakukan dengan transfer zat dari aliran satu ke aliran yang lain. Banyak jenis dari proses aliran massa dihubungkan kepada proses makanan seperti dehidrasi, destilasi, ekstraksi pelarut, dan proses pada membran. Dehidrasi adalah sebuah proses perpindahan panas, masa, dan momentum. Teori tentang pengeringan terus dikembangkan beberapa tahun belakangan ini. Proses dari perpindahan dari uap air dapat dijelaskan dengan menggunakan mekanisme dari difusi molekul, pergerakan kapiler, difusi cairan melewati lubang pori dari benda solid, difusi uap yang melewati udara dalam pori-pori, rangkaian aliran penguapan dan kondensasi, aliran hidrodinamik, dan mekanisme lainnya. Ketika perbedaan mekanisme transport terjadi, dan sangat sulit untuk memisahkan antara sebuah mekanisme, tingkatan dari pergerakan uap air digambarkan oleh sebuah effective difusivitas, D_{eff} , walaupun mekanisme ini tidak sama sekali teoritis tetapi ini sangat praktis, dan cukup baik untuk menggambarkan transport uap air. Hukum kedua Fick dari difusi sering digunakan untuk menggambarkan sebuah proses difusi uap air :

$$\frac{\partial m}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 m \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana, M adalah kandungan uap air (dry basis), t adalah waktu (s) dan D_{eff} adalah difusi uap air (m^2/s).

Di banyak situasi lain , produk makanan diasumsikan sebagai satu dimensi dan pada mulanya adalah memiliki kandungan uap air yang sama. Asumsi lain yang dimasukan dalam analisa difusi adalah pergerakan internal dari uap air sebagai sebuah tahanan utama (tidak ada tahanan luar atau external dari pergerakan uap air), tidak ada penciutan selama proses pengeringan dan mengabaikan efek dari eksternal dan internal perpindahan panas. Solusi dari persamaan fick's untuk benda yang tidak terbatas :

$$m^o = \frac{m - m_e}{m_o - m_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n + 1)^2} \exp \left[- (2n + 1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{L^2} \right] \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana, m^o adalah rasio uap air tidak berdimensi, m adalah rata-rata kandungan uap air dari material basah dengan dry basis (kg/kg), m_o adalah kandungan uap air awal dengan dry basis (kg/kg), m_e adalah kesetimbangan kandungan uap air dengan dry basis (kg/kg), L adalah ketebalan dari specimen. Dalam beberapa kasus silinder dan bola yang infinite, dapat ditulis solusinya :

$$m^o = \frac{m - m_e}{m_o - m_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4}{b_n^2} \exp \left[-\frac{b_n^2 D_{eff} t}{r_c^2} \right] \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana, $b_n, n=1,2,\dots$ adalah konstan dan r_c adalah jari-jari dari silinder (m) dan r_s adalah jari-jari bola (m).

$$m^o = \frac{m - m_e}{m_o - m_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4}{n^2} \exp \left[-n^2 \frac{b_n^2 D_{eff} t}{r_s^2} \right] \dots \dots \dots (2.5)$$

Metode Pengukuran

Banyak dari metode percobaan digunakan untk mengestimasi difusi dari uap air. [Zogza et all, 1994] mengklasifikasikan metode yang digunakan untuk memperkirakan difusi uap air termasuk :

1. Metode penyerapan.
2. *Sorption kinetic*.
3. Kurva jarak konsentrasi.
4. Metode pengeringan.

Dari banyak percobaan yang dilakukan paling banyak dilakukan dengan menggunakan metode pengeringan dan akan dijelaskan seperti di bawah ini.

Metode Analitik

Metode ini banyak digunakan beberapa tahun belakangan ini oleh beberapa peneliti. Metode ini berbasis pada persamaan (2.3), dimana ini adalah solusi analitik dari persamaan (2.2) untuk geometri yang tidak terbatas. Bentuk geometri lain pun dapat digunakan, menghasilkan rumus yang hampir serupa (persamaan 2.4 dan 2.5). Perubahan difusi berhubungan erat dengan uap air dan dapat diperkirakan dengan sebuah analisa dengan menggunakan data pengeringan. (uap air vs waktu), mengaplikasikan sebuah metode :

1. Metode slope
2. Metode optimation computer
3. Metode system teratur

Difusi dari uap air, penentuan hasilnya dengan memplot rasio uap air yang tidak berdimensi m^0 (persamaan 2.5 diperoleh dari data percobaan) diplot terhadap waktu pada diagram semilogaritmik. Di plot dengan garis lurus menurun, tetapi ada deviasi pada peneringan yang terlambat. Plot dari garis lurus dianggap sama untuk kuantitasnya ($\pi^2 D_{eff}/L^2$) dalam sebuah geometri, yang mana bentuk dari difusi ditentukan. L adalah setengah ketebalan dari satu bidang diukur pada saat awal percobaan.

Dalam kasus yang umum dari kurva pengeringan nonlinier, metode lembah dapat digunakan untuk memperkirakan efektifitas difusi uap air pada berbagai macam kandungan uap air. Ilustrasi metode ini dapat kita lihat pada Figure.1. Kurva percobaan pengeringan $\log(m^0)$ vs t dibandingkan dengan kurva pengeringan teoritis untuk memberikan bentuk pada material.

Efektifitas dari difusi uap air pada ratio uap air dapat diperkirakan melalui persamaan di bawah ini :

$$D_{eff} = \frac{(dm^*/dt)_{exp}}{(dm^*/dFo)_{theoretical}} L^2 \dots\dots\dots(2.6)$$

Metode diatas tidak memperhitungkan perubahan volume karena proses penyusutan selama proses pengeringan.

2.3 KADAR AIR KESETIMBANGAN

Jika suatu bahan ditempatkan pada suatu ruangan terbuka yang berisi udara pada waktu yang cukup lama, maka tekanan parsial uap air di udara akan mencapai keseimbangan dengan tekanan parsial uap air dalam bahan. Kadar air keseimbangan terjadi pada saat kadar air suatu bahan higroskopik seimbang dengan kelembapan relatif udara [3]. Nilai keseimbangan ini sangat bergantung pada kelembapan dan temperatur lingkungan tersebut. Selain itu, juga tergantung pada karakteristik masing-masing spesies dan faktor kematangan produk.

II.4 TEORI PSIKOMETRIK

Dalam bidang pengeringan, udara digunakan sebagai : (1) Media Pengantar Panas, (2) Sumber panas, (3) Sumber oksigen untuk pembakaran dan (4) Pembawa uap yang akan digunakan sebagai media proses.

Menurut Henderson and Perry (1970), komposisi persentase volume udara kering pada permukaan laut adalah N₂ 78.03 %, O₂ 20.99 %, A 0.94 %, CO₂

0.03 %, H₂ 0.01 %, Ne 0.00123 %, Kr 0.0005 %, Xe 0.000006 %. Untuk perhitungan teknik, udara dinyatakan hanya terdiri dari Nitrogen dan Oksigen. Udara pada atmosfer tidak pernah benar-benar kering. Udara pada atmosfer normal merupakan campuran udara kering dan uap air. Untuk mengetahui persoalan mengenai campuran udara uap air yang mencakup pemanasan, pendinginan, kelembaban dan gabungannya dapat dipecahkan dengan menggunakan grafik psikrometrik.

Grafik Psikrometrik atau *Psychrometric Charts*

Menurut Henderson and Perry (1970), Grafik psikrometrik (*Psychrometric Charts*) adalah sebuah grafik yang menyajikan sifat – sifat fisika dan panas udara atmosfer.

Istilah-Istilah pada Grafik Psikrometrik

a. *Dry-Bulb Temperature*

Dry-Bulb Temperature atau temperatur bola kering (*T_{bk}*) adalah temperatur udara sebenarnya.

b. *Wet bulb temperature*

Wet bulb temperature atau temperatur bola basah (*T_{bb}*) adalah temperatur pengembunan campuran udara – uap air bila dipergunakan untuk pengeringan (temperatur campuran udara dan uap air dalam keadaan jenuh, RH 100 %).

c. *Dew-Point Temperature*

Dew-Point Temperature atau titik embun adalah temperatur pengembunan campuran udara – uap air jika didinginkan.

d. *Volume Lengas*

Volume Lengas atau *Humid volume* adalah volume campuran udara-uap air pada kondisi kelembaban relatif dan temperatur tertentu.

e. *Relative Humidity*

Relative Humidity adalah perbandingan (%) antara tekanan uap air parsial dengan tekanan uap air jenuh dalam udara tertentu pada tekanan dan temperatur yang sama.

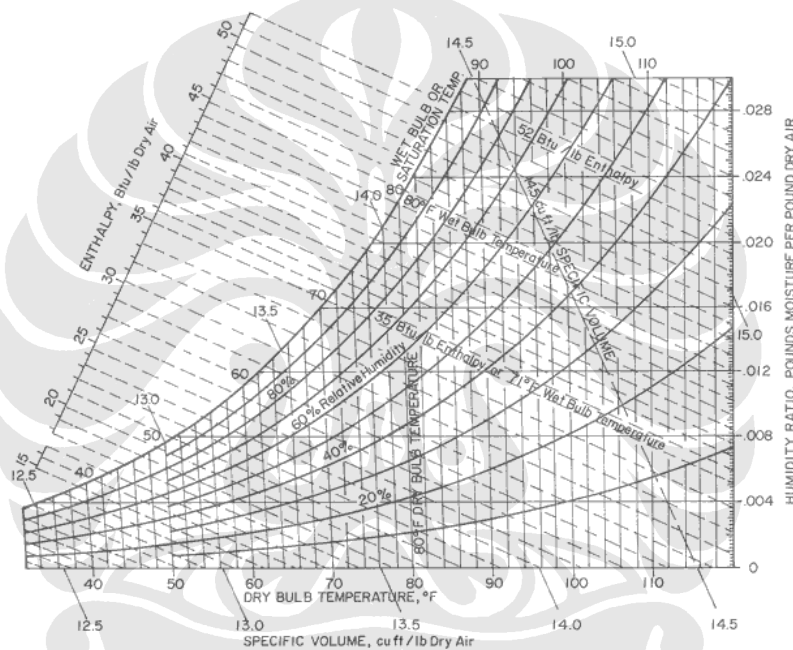
Relative Humidity disebut juga Kelembaban relative atau Kelembaban nisbi atau RH.

f. *Specific Humidity*

Specific Humidity adalah banyaknya pounds uap air per pounds udara kering dalam campuran udara tertentu *Specific Humidity* disebut juga kelembaban absolute atau kelengasan mutlak atau *humidity ratio* atau *absolute humidity* simbolnya H.

g. Udara Jenuh

Ada batas jumlah uap air di udara yang dapat dipegang pada temperatur tertentu. Udara yang dipegang sama banyaknya dengan uap airnya, di sebut udara jenuh.



Gambar 2.2. Grafik Psikrometrik.

Sumber : ASHRAE Fundamentals Handbook .

2.5 MEKANISME PENGERINGAN

Proses pengeringan diperoleh dengan cara penguapan air yaitu dengan menurunkan RH dengan cara mengalirkan udara panas disekeliling bahan, sehingga tekanan uap air bahan menjadi lebih besar daripada tekanan uap air di udara. Perbedaan tekanan inilah yang menyebabkan terjadinya aliran uap air dari bahan ke udara.

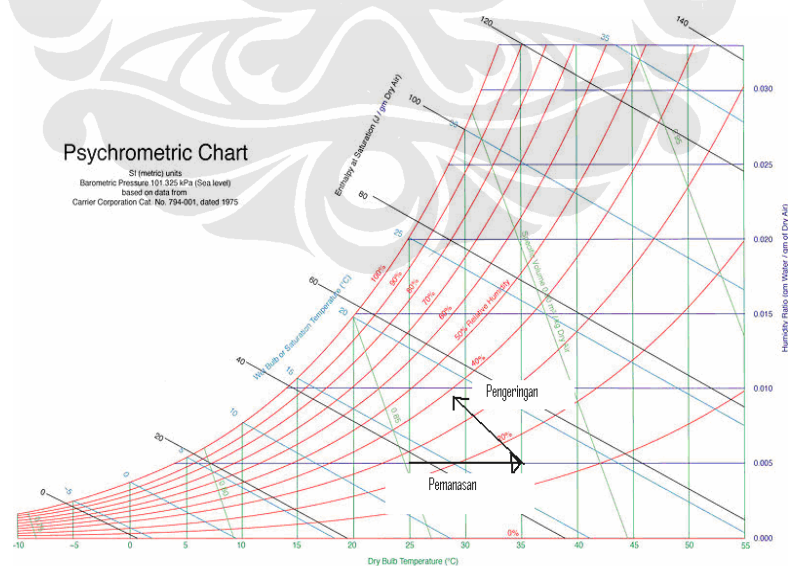
Proses pengeringan pada bahan dimana udara panas dialirkan dapat dianggap sebagai suatu proses adiabatik. Panas yang dibutuhkan untuk penguapan air bahan hanya diberikan oleh udara pengering. Ketika udara pengering

menembus bahan basah sebagian panas sensibel udara pengering diubah menjadi panas laten sambil menghasilkan uap air.

Sebelum pengeringan tekanan uap air bahan sama dengan tekanan uap air udara (dalam keadaan seimbang). Saat pengeringan dimulai, uap panas yang dialirkan melewati permukaan bahan akan menaikkan tekanan uap air bahan, terutama pada daerah permukaan sejalan dengan kenaikan suhunya. Pada saat itu terjadi perpindahan massa dari bahan ke udara dalam bentuk uap air berlangsung (terjadi proses pengeringan pada permukaan bahan). Setelah itu tekanan uap air pada permukaan bahan akan menurun. Setelah kenaikan suhu terjadi pada seluruh bagian bahan maka proses penguapan pada permukaan bahan diulang lagi sampai akhirnya setelah air bahan berkurang tekanan uap air bahan akan menurun sampai terjadi keseimbangan dengan udara sekitarnya.

2.6 MEKANISME PENDINGERIAN DALAM GRAFIK PSIKOMETRIK

Proses pengeringan suatu material terjadi pada dua tahap yaitu proses pemanasan dan proses pengeringan. Proses pemanasan pada awalnya memanasi udara sekitar lingkungan bahan dengan tujuan menurunkan kelembapan relatif dari udara sekitar. Sedangkan pada proses pengeringan dilakukan untuk menurunkan temperatur udara karena terjadi perpindahan panas dari udara ke produk.



Gambar 2.3. Proses Pendingerian dalam grafik psikometrik.

Sumber : ASHRAE Fundamentals Handbook.

2.7 KADAR AIR/KANDUNGAN KELEMBAPAN

Menurut ASHRAE Fundamentals Handbook, ada 2 cara menyatakan kadar air dalam suatu bahan yaitu :

1. Basis kering / dry basis (d.b.) yang diperoleh dengan membagi berat air dalam bahan terhadap berat kering bahan pangan.

$$d.b. = \frac{M_w}{M_d} \times 100\% \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana : M_w = Massa air (kg)

M_d = Massa kering bahan (kg)

2. Basis basah / wet basis (w.b.) yang diperoleh dengan membagi berat air dalam bahan terhadap berat total bahan pangan.

$$w.b. = \frac{M_w}{M_w + M_d} \times 100\% \dots\dots\dots(2.8)$$

Hubungan antara basis basah dan basis kering dapat dilihat pada persamaan dibawah ini :

$$d.b. = \frac{w.b.}{100 - w.b.} \times 100\% \dots\dots\dots(2.9)$$

2.8 PENENTUAN JUMLAH AIR BAHAN YANG DIUAPKAN

Keadaan awal (Sebelum pengeringan dilakukan)

Massa awal bahan	=	X	
Kadar air awal	=	M_o	
Massa air	=	$M_o * X$	
Massa kering	=	$X - (M_o * X)$(2.10)

Keadaan akhir (Setelah pengeringan dilakukan)

Massa akhir	=	Y	
Kadar air akhir	=	M_f	
Massa air	=	$M_f * Y$	
Massa kering	=	$Y - (M_f * Y)$(2.11)

Karena massa kering besarnya selalu tetap maka :

$$X - (M_o * X) = Y - (M_f * Y)$$

$$X(1 - M_o) = Y(1 - M_f)$$

$$Y = \frac{1 - M_o}{1 - M_f} X$$

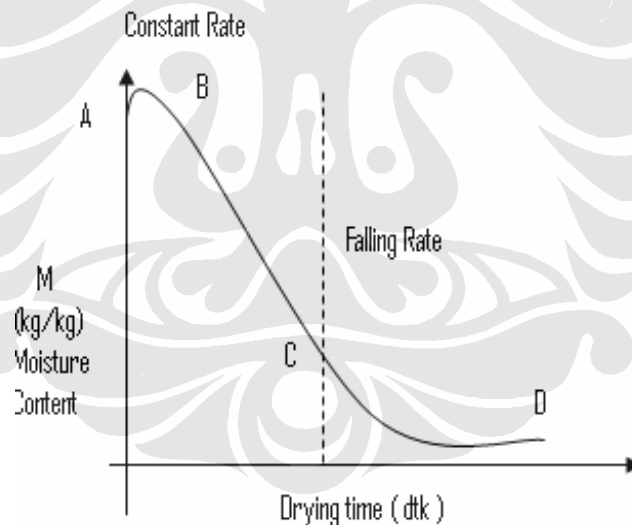
Jumlah air yang diuapkan = X - Y

$$X - \frac{1 - M_o}{1 - M_f} X = \left(1 - \frac{1 - M_o}{1 - M_f}\right) X = \frac{M_o - M_f}{1 - M_f} X \dots\dots\dots(2.12)$$

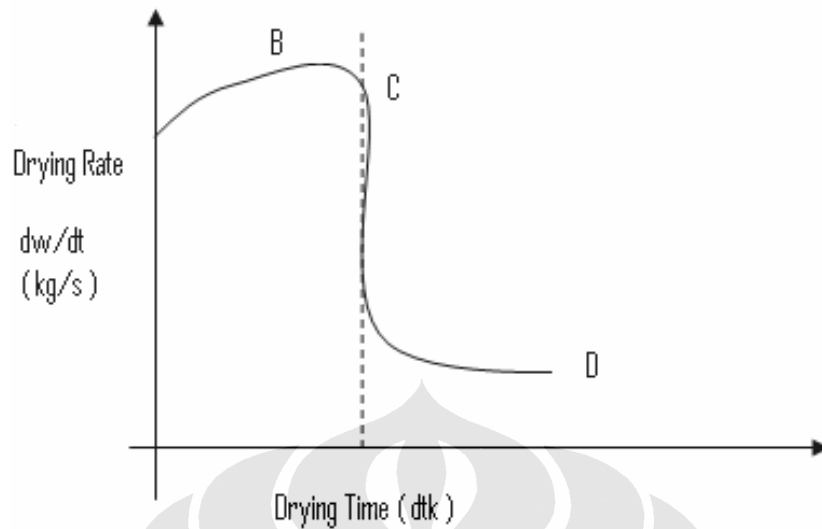
2.9 LAJU PENGERINGAN

Laju pengeringan sebanding dengan perbedaan tekanan uap air didalam bahan pangan dan pada permukaan bahan pangan [4]. Karena adanya migrasi air dari dipermukaan bahan pangan menuju udara maka konsentrasi air dalam bahan pangan semakin lama akan semakin berkurang. Hal ini akan mengakibatkan turunnya perbedaan tekanan uap. Karena perbedaan tekanan uap semakin menurun maka penguapan air dalam permukaan bahan pangan juga akan berkurang, hal ini akan mengakibatkan kecepatan perpindahan air dari bagian dalam bahan menuju permukaan juga akan berkurang.

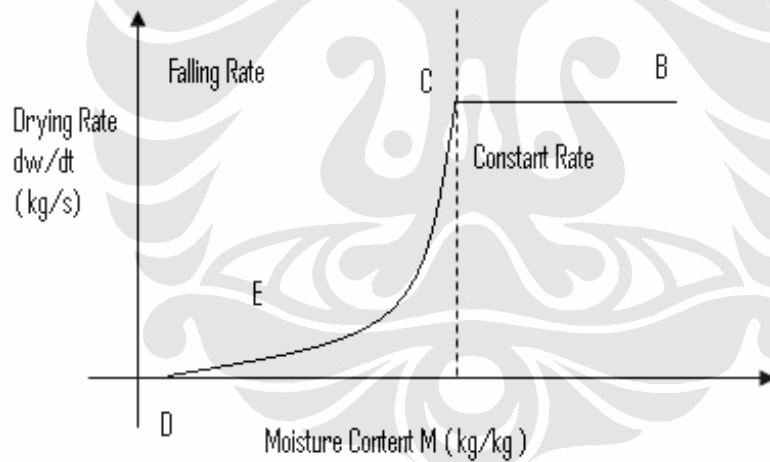
Proses pengeringan dapat dibagi menjadi 2 periode [5] yaitu laju pengeringan konstan dan laju pengeringan menurun.



Gambar 2.4. Grafik Kadar air sebagai fungsi waktu.
 Sumber : Chrisardianto, Andry, 2005



Gambar 2.5. Grafik Laju pengeringan terhadap waktu.
 Sumber : Chrisardianto,Andry,2005.



Gambar 2.6. Grafik Laju pengeringan terhadap kadar air.
 Sumber : Chrisardianto,Andry,2005.

Gambar 2.4 menunjukkan kadar air sebagai fungsi waktu untuk keadaan pengeringan suatu bahan Bagian A-B pada semua grafik menunjukkan periode pemanasan permukaan (*warming up*) sedangkan bagian B-C adalah laju pengeringan konstan dimana kadar air dari dalam bahan akan bergerak menuju permukaan dan akan memenuhi permukaan hingga mencapai kejenuhan. Kurva C-D adalah periode penurunan yaitu terjadi proses penguapan terhadap kadar air

pada permukaan bahan yang diikuti dengan dengan perpindahan air dari dalam bahan menuju permukaan.

Kadar air pada titik C disebut dengan kadar air kritis, yang nilainya tergantung pada jenis material. Kadar air kritis sendiri adalah suatu kadar air pada bahan saat laju pengeringan pertama kali mulai mengalami penurunan. Didalam periode konstan air bergerak dalam bahan secara cepat menuju keadaan jenuh dipermukaan. Jika panas diberikan secara konveksi dari udara panas saja, maka temperatur permukaan merupakan temperatur bola basah (proses terjadi pada temperatur bola basah yang menjadi salah satu dari bagian laju pengeringan konstan).

Pada periode penurunan yang ditunjukkan oleh kurva C-D dapat dibagi pada 2 zona yaitu zona tempat terjadinya perpindahan air dari permukaan bahan menuju udara sekitar dan zona perpindahan dari dalam bahan menuju permukaan material. Zona pertama (kurva C-E pada gambar 3) terjadi sesaat setelah melalui titik kritis C.

Penurunan laju pengeringan disebabkan oleh penurunan luas permukaan basah. Bagian kering dari material akan timbul ke udara mengurangi jumlah penguapan per satuan luas permukaan. Laju pengeringan pada zona ini berbentuk linear dan dapat dilihat pada bagian C-E pada gambar 3. Sedangkan pada zona kedua dimana air didalam inti akan bergerak mengontrol laju pengeringan seperti ditunjukkan pada kurva D-E pada gambar 3. Dalam pengeringan untuk menghasilkan kadar air yang rendah, periode ini mempunyai pengaruh yang cukup besar dalam menentukan laju pengeringan. Pergerakan air didalam inti disebabkan oleh beberapa mekanisme seperti difusitas, gradien tekanan, laju aliran kapiler dan sebagainya. Pada benda berpori, pengeringan sering terjadi oleh penguapan didalam bahan dibandingkan di permukaan.

2.10 AKTIVITAS AIR

Dalam mengeringkan beberapa bahan yang membutuhkan perhatian higienis yang khusus seperti bahan pangan dan jamu herbal, ketersediaan air dalam pertumbuhan mikroorganisme, spora dan penyertaan dalam beberapa reaksi kimia menjadi perhatian yang cukup penting dalam pengeringan jamu herbal. Ketersediaan air ini tergantung pada aktivitas air (a_w) yang didefinisikan sebagai

perbandingan antara tekanan parsial air pada suatu bahan yang basah terhadap tekanan keseimbangan uap air pada suhu yang sama. Tabel dibawah ini akan memberikan nilai a_w minimum untuk pencegahan pertumbuhan mikroorganisme. Jika nilai a_w diturunkan dengan cara pengeringan, maka pertumbuhan mikroorganisme dapat dihambat, cara lain untuk menurunkan harga konstanta aktivitas air adalah dengan menggunakan suatu material pengikat air seperti gula dan sebagainya.

Tabel 2.1. Nilai minimum aktivitas air pada berbagai mikroorganisme.

No	Mikroorganisme	Aktivitas Air
1	Organisme Penghasil lendir pada daging	0,98
2	Spora <i>Pseudomonas, Bacillus cerei</i>	0,97
3	Spora <i>B. subtilis, C. Botulinum</i>	0,95
4	<i>C. botulinum, Salmonella</i>	0,93
5	Bakteri pada umumnya	0,91
6	Ragi pada umumnya	0,88
7	<i>Aspergillus Niger</i>	0,85
8	Jamur pada umumnya	0,80
9	Bakteri halofilik	0,75
10	Jamur Xelofilik	0,65
11	Ragi Osmofilik	0,62

Sumber : Devashatin, S., 2001. *Mujumdar's Practical Guide To Industrial Drying. Panduan Praktis Mujumdar Untuk Pengeringan Industrial. Terjemahan Oleh : A.H. Tambunan, D.Wulandari, E. Hartulistiyoso dan L.O.Nelwan. IPB Press, Bogor.*

2.11 PRODUK JAMU PT.X



Gambar 2.7. Produk jamu PT.X sebelum proses pengeringan.

Tapel pilis merupakan jamul yang dihasilkan PT.X, jamu ini berfungsi menghangatkan tubuh dan menghilangkan nyeri dan pegal-pegal khususnya untuk wanita yang baru saja melahirkan. Cara penggunaan produk ini cukup sederhana, yaitu tapel parem dilarutkan dengan menggunakan air panas sehingga tapel berbentuk butiran-butiran (seperti pasir) lalu tapel tersebut dicampur dengan minyak gandapura dan dioleskan ke bagian tubuh yang pegal/nyeri.

Adapun komposisi Tapel pilis untuk pembuatan 12 kg jamu, adalah sebagai berikut :

Tabel 2.2. Kompisisi untuk pembuatan 12 kg jamu.

No	Nama bahan	Jumlah berat pada campuran
1	Tepung A	10 kg
2	R.O	2 kg
3	Air	9 liter
4	Amilum	700 ml \approx 1,05 kg

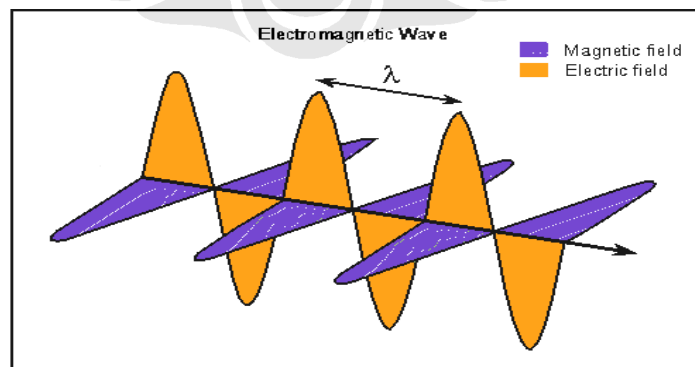
Sumber : data PT.X

Pembuatan jamu secara garis besar adalah sebagai berikut :

1. Semua bahan campuran (bahan-bahan yang tercantum pada tabel diatas) dicampur dengan menggunakan blender agar semua bahan tercampur dengan homogen.
2. Kemudian, adonan tersebut dicetak sehingga berat awal masing-masing tapel pilis adalah 16 gram.
3. Bahan hasil cetakan tersebut diangin-anginkan selama 2 jam sebelum dikeringkan dengan matahari.
4. Bahan dikeringkan selama 24 jam pada kamar pengeringan dengan menggunakan matahari.
5. Bahan dikeringkan dengan menggunakan oven konveksi selama 24 jam, kemudian kadar air bahan diperiksa (apakah sudah mencapai 5%) selanjutnya bahan diperiksa angka mikroorganismenya untuk mencegah iritasi kulit pada konsumen.
6. Tapel siap digunakan.

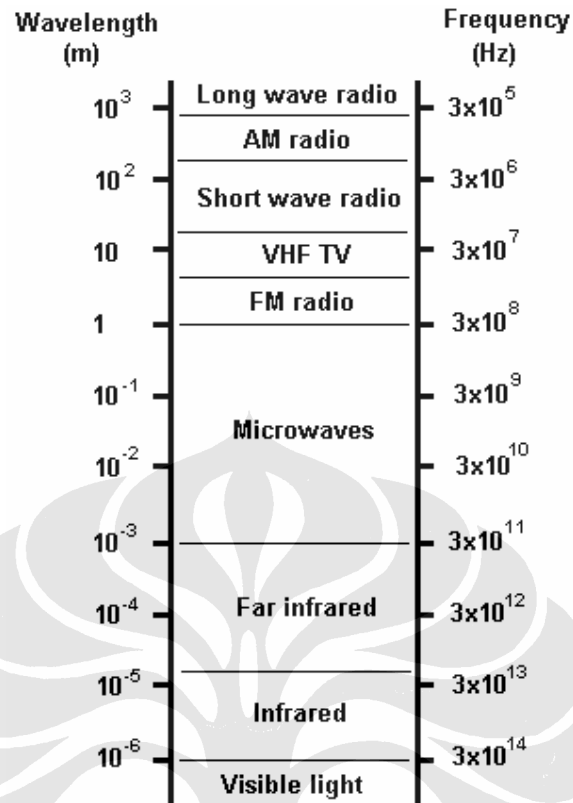
2.12 MICROWAVE

Microwave oven atau yang dikenal sebagai *microwave* adalah suatu alat yang menggunakan radiasi gelombang mikro (frekuensi 2450 Mhz) untuk memanaskan suatu benda (dalam hal ini adalah makanan). Alat ini menggunakan gelombang elektromagnetik mikro (karenanya disebut *microwaves*) yang diemisikan oleh *magnetron* untuk menggerakkan/memutar polarisasi dari molekul air yang terdapat dalam zat tersebut. Pergerakan dari polarisasi molekul itu meningkatkan panas dari zat.



Gambar 2.8. Medan magnet dan medan elektrik sebuah gelombang elektromagnetik.

Sumber : www.wikipedia.com



Gambar 2.9. Frekuensi dan panjang gelombang beberapa gelombang elektromagnetik.

Sumber : www.wikipedia.com

Microwave oven terdiri dari beberapa komponen berikut ini :

- Transformator bertegangan tinggi, digunakan untuk memberikan energi pada *magnetron*.
- *Magnetron* berongga.
- *Magnetron control circuit* (biasanya dengan *microcontroller*).
- Pengarah gelombang.
- Kamar pemanasan.

Microwave oven biasanya bekerja dengan melewati radiasi gelombang mikro yang tidak terionisasi pada makanan, biasanya gelombang tersebut berada pada frekuensi 2.45 Ghz (panjang gelombang 12,24 cm). Besarnya frekuensi microwave ini berada pada frekuensi radio pada umumnya dan frekuensi infrared.

Air, lemak dan substansi lainnya didalam makanan menyerap energi dari gelombang mikro, yang disebut pemanasan dielektrik. Banyak molekul seperti air merupakan dipol elektrik, yang berarti molekul tersebut memiliki kutub positif dan negatif dan oleh karena itu molekul tersebut berputar terus menerus akibat perubahan medan listrik yang dilakukan gelombang mikro (*microwave*). Pergerakan ini menyebabkan panas karena ketika molekul tersebut berputar dan menghasilkan panas. Pemanasan pada *microwave* lebih efektif dilakukan untuk air berfase cairan apabila dibandingkan pemanasan pada lemak dan gula (dimana memiliki momen dipol yang lebih rendah).

Pemanasan *microwave* kadang kala dijelaskan sebagai resonansi perputaran dari molekul air, tetapi hal ini adalah tidak benar, karena resonansi hanya terjadi pada uap air pada frekuensi yang lebih tinggi yaitu mencapai 20 Ghz. Padahal, alat mikrowave yang digunakan pada industri umumnya memiliki frekuensi 915 Mhz. Frekuensi yang digunakan pada mikrowave dipilih berdasarkan atas dua pembatasan utama yaitu frekuensi tersebut haruslah salah satu dari frekuensi ISM, ada sekitar 3 frekuensi yang bekerja sesuai dengan frekuensi *microwave* tetapi frekuensi tersebut tidak digunakan untuk memasak. Dua dari frekuensi tersebut bekerja pada frekuensi 5.8 Ghz dan 24.125 Ghz tetapi tidak digunakan pada *microwave* karena diperlukan biaya dan energi yang sangat besar untuk menghasilkan frekuensi tersebut. Dan frekuensi yang ketiga bekerja pada 433,92 Mhz dimana dibutuhkan peralatan yang mahal untuk menghasilkan energi yang cukup tanpa menghasilkan interferensi diluar pita.

Kesalahan penafsiran yang terjadi pada *microwave* biasanya adalah bagaimana *microwave* memanaskan makanan, yaitu dari dalam ke bagian luar. Pada kenyataannya *microwaves* diserap oleh permukaan terluar dari substansi makanan dimana mempunyai kesamaan metode dengan pemanas konvensional. Salah penafsiran ini berkembang karena *microwaves* menembus substansi kering yang bersifat tidak konduktif pada permukaan makanan, dan dengan begitu biasanya meninggalkan panas awal yang lebih dalam dari pada metode pemanasan yang lain. Berdasarkan pada air, kedalaman dari peninggalan awal panas mungkin mencapai beberapa centimeter bahkan lebih, sebaliknya pada pemanasan konveksi

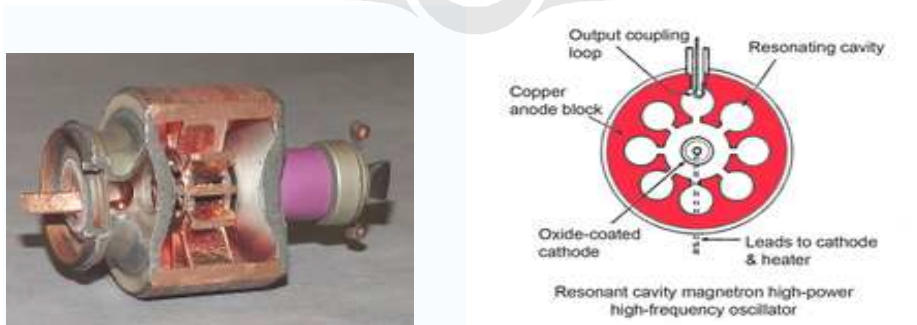
peninggalan panas hanya menembus tipis permukaan makanan. Kedalaman penetrasi panas dari microwave berkaitan dengan komposisi makanan dan frekuensi, dimana frekuensi *microwave* yang lebih rendah mempunyai penetrasi yang lebih baik.

Kebanyakan *microwave* dapat memberikan penggunaanya beberapa jenis pemanasan, meliputi satu atau beberapa level *defrosting*. Pada *microwave oven* pada umumnya, tidak ada perubahan dalam intensitas radiasi *microwave*, akan tetapi variasi pemanasan dilakukan dengan menghidup dan mematikan *magnetron* setiap beberapa detik dalam selang waktu tertentu.

Kamar pemanasan itu sendiri disebut dengan “sangkar Faraday”, dimana dapat mencegah mikrowaves keluar menuju lingkungan. Pintu oven biasanya terbuat dari panel kaca, tetapi mempunyai lapisan mata jala konduktiv yang digunakan untuk menjaga isolasi. Karena ukuran lubang-lubang pada mata jala konduktif biasanya lebih kecil dari panjang gelombang mikro (12 cm), maka radiasi gelombang mikro tidak dapat menembus panel kaca tersebut.

Beberapa varian dari microwave konvensional antara lain adalah *microwave* konveksi, microwave ini adalah kombinasi dari *microwave* standar dan *convection oven*. Alat ini memberikan kecepatan dalam memasak dan mengurangi gosongnya masakan.

2.12.1 Cavity Magnetron



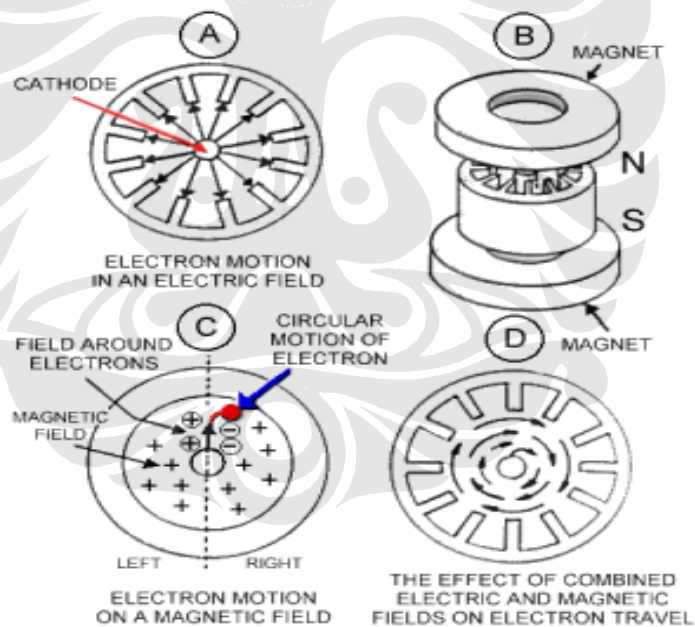
Gambar 2.10. *Cavity Magnetron*.

Sumber : www.wikipedia.com

Teori dari pengoperasian magnetron berkaitan dengan pergerakan elektron dibawah kombinasi dari pengaruh medan magnet dan medan listrik. Untuk mengoperasikan silinder tersebut, elektron harus bergerak dari katode menuju anode.

Ada 2 hukum dasar yang mengatur pergerakan elektron yaitu :

1. Gaya yang digunakan oleh medan elektrik pada electron proporsional pada kekuatan dari medan magnet. Electron cenderung untuk bergerak dari potensial negative menuju potensial positif.
2. Gaya yang digunakan pada electron dalam medan magnet adalah pada sudut positif untuk medan magnet dan untuk lintasan dari electron. Arah dari gaya ini menyebabkan elektron berproses cenderung untuk membentuk kurva daripada membentuk garis lurus menuju anode.



Gambar 2.11. Pergerakan elektron dalam magnetron.

Sumber : www.wikipedia.com

2.12.2 Efek dari medan magnet

Pada gambar 2.11 , dua magnet permanen ditambahkan diatas dan dibawah struktur silinder, dalam gambar 3c asumsikan magnet yang berada diatas adalah kutub utara, dan magnet yang sebelah bawah adalah kutub selatan, sehingga medan magnet akan mendekati dari kanan kertas. Ketika elektron bergerak melewati konduktor menyebabkan medan magnet terbentuk mengitari konduktor, sehingga elektron bergerak melewati ruang cenderung untuk membuat medan magnet mengitari dirinya sendiri. Pada sisi kiri lintasan elektron, menginduksi medan magnet dirinya sendiri menambah medan magnet yang mengitarinya. Pada sisi lain dari lintasan elektron (sisi kanan), mempunyai efek yang bertolak belakang dimana terjadi pengurangan dari efek medan magnet permanen. Oleh karena hal tersebut sisi kanan dari lintasan mempunyai medan magnet yang lebih lemah, dan lintasan elektron menghasilkan gerak melingkar untuk menuju anode.

Proses ini dimulai ketika tegangan rendah diberikan pada filament, dimana menyebabkan filament tersebut panas (tegangan dari filament biasanya antara 3-4 Vac, tergantung pada pembuatan dan modelnya). Peningkatan temperatur menyebabkan peningkatan aktivitas molekular didalam katode, hal ini menyebabkan katode memancarkan elektrons.

Ukuran dari rongga menentukan resonansi frekuensi, dan dengan demikian menentukan frekuensi yang dipancarkan oleh *microwaves*. Meskipun demikian frekuensi yang dihasilkan tidak dapat dikontrol secara tepat. Ketika frekuensi yang tepat dibutuhkan, maka alat lain Klystron dapat digunakan.

Magnetron merupakan alat yang cukup efisien, sebagai contohnya dalam *microwave oven* yang mempunyai daya input 1100 Watt umumnya akan menghasilkan 700 Watt energi *microwave*, maka efisiensinya mencapai 65%.

2.12.3 Interaksi medan elektromagnetik terhadap material

Pada dasarnya material dapat dibagi berdasarkan kemampuannya dalam berinteraksi dengan medan elektromagnetik, keempat kelompok tersebut antara lain :

1. Konduktor

Material yang mempunyai elektron bebas didalamnya, contohnya seperti metal, material ini pada umumnya memantulkan gelombang elektromagnetik, seperti cermin yang memantulkan cahaya. Material ini biasanya digunakan sebagai pengarah gelombang elektromagnetik dan *applicators*.

2. Insulator

Material ini menyerap dan memantulkan gelombang elektromagnetik pada umlah yang dapat diabaikan (sangat sedikit sekali) biasanya gelombang elektromagnetik hanya menembus material ini, karenanya material sering disebut material yang transparant. Contoh dari material ini antara lain gelas, keramik dan udara. Material ini biasanya digunakan untuk menopang material yang akan dipanaskan didalam *microwave*, seperti digunakan sebagai sabuk conveyer dan sebagainya.

3. Dielektrik

Material ini mempunyai karakteristik antara konduktor dan insulator, material ini dapat menyerap gelombang elektromagnetik dan merubahnya menjadi panas. Contoh dari material ini antara lain yaitu air, minyak, kayu dan material yang mempunyai kandungan air didalamnya.

4. Campuran magnetik

Material ini biasanya digunakan sebagai pelapisan dan untuk mencegah kebocoran gelombang elektromagnetik.

2.12.4 Faktor-faktor yang mempengaruhi pengeringan dalam *microwave*

1. Kandungan air dalam material

Jumlah kandungan air bebas dalam suatu substansi sangat mempengaruhi konstanta dielektriknya, dimana air mempunyai konstanta dielektrik yang cukup tinggi yaitu 78 pada temperatur ruangan. Oleh karena itu, semakin banyak presentase air dalam suatu substansi maka konstanta dielektriknya semakin tinggi

(biasanya proposional). Walaupun demikian ada beberapa kriteria yang harus diterapkan dalam hubungan kandungan air dan konstanta dielektrik antara lain :

- a. Semakin tinggi kandungan air maka konstanta dielektrik juga semakin tinggi.
- b. *Dielectric loss*, biasanya meningkat dengan meningkatnya kandungan air tetapi pada kandungan air mencapai 20%-30%, fenomena tersebut terhenti dan pada kandungan air yang lebih tinggi *dielectric loss* cenderung menurun.
- c. Konstanta dielektrik dari campuran berbagai material, berada diantara komponen-komponen penyusunnya.
- d. Semakin tinggi konstanta dielektrik maka pengeringan akan semakin cepat.

Karena proses pengeringan adalah suatu metode yang berfokus pada penghilangan air dari suatu material, hal ini sangat menarik untuk diamati bahwa ketika cairan dikeluarkan maka konstanta dielektrik semakin menurun, karenanya pengeringan material menjadi menurun. Pada banyak kasus hal ini cenderung menjadi pembatasan diri terhadap proses pengeringan karena material menjadi transparan ketika kandungan airnya sangat rendah.

2. Kerapatan massa (densitas)

Konstanta dielektrik dari udara adalah satu, karenanya untuk semua proses pengolahan, udara mempunyai sifat transparan yaitu hanya melewatkan gelombang elektromagnetik. Oleh karena itu keberadaan udara dalam suatu material menurunkan konstanta dielektrik dari material tersebut. Maka dapat disimpulkan ketika pori-pori suatu material diisi udara yang berarti kerapatannya menurun maka konstanta dielektriknya akan menurun dan mengakibatkan pengurangan laju pengeringan.

3. Temperatur

Pengaruh temperatur terhadap konstanta dielektrik cukup kompleks, konstanta dielektrik dapat turun ataupun naik ketika temperatur dinaikkan dan diturunkan hal ini bergantung dari material tersebut. Pada umumnya material yang berada dibawah titik pembekuannya menunjukkan konstanta dielektrik yang rendah. Diatas suhu pembekuan keadaannya menjadi sulit untuk diprediksi.

4. Kedalaman penetrasi

Tabel 2.3. Frekuensi gelombang mikro dan kedalaman penetrasi.

Frekuensi (Mhz)						
	5,0	13,56	27,12	40,0	915	2450
Panjang gelombang						
Meter	60	22,1	11,1	7,5	0,328	0,122
Feets	196,9	72,6	36,3	24,6	1,07	0,4
Kedalaman penetrasi						
Meter	23,9	8,8	4,4	3,0	0,13	0,049
Feets	78,4	28,9	14,4	9,8	0,425	0,158

Sumber : Mujumdar ,A.S., 1995, *Handbook of Industrial Drying*, 2nd edition, Marcel Dekker, New York.

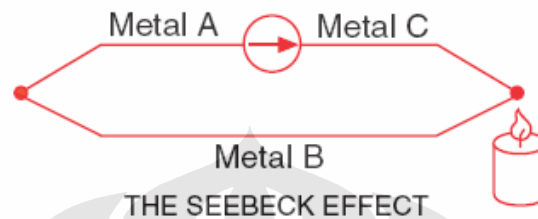
2.13 THERMOCOUPLE

Dalam elektronik dan dalam teknik elektri, thermokopel banyak digunakan sebagai sensor suhu atau temperatur dan dapat juga digunakan untuk mengubah perbedaan potensial suhu menjadi perbedaan potensial elektrik. Batsan yang penting adalah akurasi yang mana sistem errornya tidak lebih dari 1⁰C.

Di tahun 1821, Seorang Fisikawan Estonia bernama Thomas Johann Seebeck menemukan bahwa ketika konduktor (contohnya metal) di letakkan pada temperature yang berbeda, ini kan menghasilkan tegangan. Ini diketahui sebagai efek termoelektrik atau efek Seebeck Beberapa mencoba untuk mengukur tegangan dengan menghubungkan ke koduktor lain pada ujungnya diberi panas. Penambahan konduktor ini akan mengalami gradient atau perbedaan temperature dan menimbulkan tegangan yang belawanan dari awalnya. Untungnya, besarnya efek ini tergantung dari material yang digunakan. Dengan menggunakan metal yang tidak sama untuk melengkapi rangkaian akan membuat rangkaian, menghasilkan dua taraf perbedaan tegangan, meninggalkan sebuah perbedaan tegangan yang sangat kecil untuk diukur. Perbedaan tegangan bertambah sebanding dengan pertambahan temperature, dan mempunyai ciri khas antara 1 dan 70 mikrovolt per ⁰C ($\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$) untuk range saat ini dengan kombinasi metal yang tersedia. Beberapa kombinasi menjadi populer di standart industri, dilihat dari

harga, ketersediannya, kebaikannya, titik leleh, sifat kimia, stabilitas dan keluarannya. Pasangan dua buah metal ini dinamakan Termokopel.

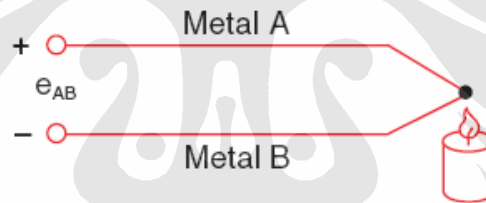
Ketika dua buah kawat dihubungkan dengan jenis logam yang berbeda pada ujung yang satu digabungkan dan ujung yang satu lagi dipanaskan, ada aliran listrik yang continue dalam rangkaian termokopel tersebut.



Gambar 2.12. Efek Seebeck.

Sumber : www.omega.com

Jika rangkaian diputus pada bagian tengahnya, maka akan menjadi rangkaian tegangan yang terbuka (the Seebeck voltage) sebagai sebuah fungsi temperature dan komposisi dari dua buah metal.



Gambar 2.13. Perbedaan tegangan antara kedua kawat karena perbedaan temperatur.

Sumber : www.omega.com

Semua metal yang berbeda menunjukkan efek seperti ini. Dari banyak kombinasi dari dua buah metal memiliki karakteristik masing-masing yang sangat penting untuk diperhatikan. Untuk perubahan kecil pada temperature maka Seebeck voltage mempertunjukkan kelinieran yang proposional terhadap temperature.

$$\Delta e_{AB} = \alpha \Delta T$$

Dimana α adalah koefisien Seebeck.

Type K (chromel–alumel) umumnya banyak digunakan pada termokopel untuk tujuan umum. Type ini tidak terlalu mahal dan sangat populer, dan tersedia dalam banyak jenis probe. Tersedia untuk range temperature antara -200°C sampai dengan $+1200^{\circ}\text{C}$.