

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Konsep Dasar Pengeringan**

Pengeringan merupakan proses pengurangan kadar air suatu bahan hingga mencapai kadar air tertentu. Dasar proses pengeringan adalah terjadinya penguapan air bahan ke udara karena perbedaan kandungan uap air antara udara dengan bahan yang dikeringkan. Agar suatu bahan dapat menjadi kering, maka udara harus memiliki kandungan uap air atau kelembaban yang lebih rendah dari bahan yang akan dikeringkan (Trayball E.Robert, 1981).

Definisi lain dari proses pengeringan yaitu pemisahan sejumlah kecil air atau zat cair lain dari suatu bahan, sehingga mengurangi kandungan zat cair tersebut. Pengeringan biasanya merupakan langkah terakhir dari sederetan operasi dan hasil pengeringan biasanya siap untuk dikemas (Mc Cabe, 1993).

Buckle, et al., (1987). Menyatakan bahwa kecepatan pengeringan suatu bahan dipengaruhi oleh beberapa factor, antara lain : (1) sifat fisik bahan, (2) pengaturan geometris produk sehubungan dengan permukaan alat atau media perantara pemindahan panas, (3) sifat-sifat dari lingkungan alat pengering (suhu, kelembaban dan kecepatan udara, serta (4) karakteristik alat pengering (efisiensi perpindahan panas).

Menurut Brooker, et al., (1974), beberapa parameter yang mempengaruhi waktu yang dibutuhkan dalam proses pengeringan, antara lain :

##### **a. Suhu Udara Pengering**

Laju penguapan air bahan dalam pengeringan sangat ditentukan oleh kenaikan suhu. Bila suhu pengeringan dinaikkan maka panas yang dibutuhkan untuk penguapan air bahan menjadi berkurang. Suhu udara pengering berpengaruh terhadap lama pengeringan dan kualitas bahan hasil pengeringan. Makin tinggi suhu udara pengering maka proses pengeringan makin singkat. Biaya pengeringan dapat ditekan pada kapasitas yang besar jika digunakan pada suhu tinggi, selama suhu tersebut sampai tidak merusak bahan.

b. Kelembaban Relatif Udara Pengering

Kelembaban udara berpengaruh terhadap pemindahan cairan dari dalam ke permukaan bahan. Kelembaban relatif juga menentukan besarnya tingkat kemampuan udara pengering dalam menampung uap air di permukaan bahan. Semakin rendah RH udara pengering, maka makin cepat pula proses pengeringan yang terjadi, karena mampu menyerap dan menampung uap air lebih banyak dari pada udara dengan RH yang tinggi. Laju penguapan air dapat ditentukan berdasarkan perbedaan tekanan uap air pada udara yang mengalir dengan tekanan uap air pada permukaan bahan yang dikeringkan. Tekanan uap jenuh ini ditentukan oleh besarnya suhu dan kelembaban relatif udara. Semakin tinggi suhu, kelembaban relatifnya akan turun sehingga tekanan uap jenuhnya akan naik dan sebaliknya.

c. Kecepatan Aliran Udara Pengering

Pada proses pengeringan, udara berfungsi sebagai pembawa panas untuk menguapkan kandungan air pada bahan serta mengeluarkan uap air tersebut. Air dikeluarkan dari bahan dalam bentuk uap dan harus secepatnya dipindahkan dari bahan. Bila tidak segera dipindahkan maka air akan menjenuhkan atmosfer pada permukaan bahan, sehingga akan memperlambat pengeluaran air selanjutnya. Aliran udara yang cepat akan membawa uap air dari permukaan bahan dan mencegah uap air tersebut menjadi jenuh di permukaan bahan. Semakin besar volume udara yang mengalir, maka semakin besar pula kemampuannya dalam membawa dan menampung air di permukaan bahan.

d. Kadar Air Bahan

Pada proses pengeringan sering dijumpai adanya variasi kadar air bahan. Variasi ini dapat dipengaruhi oleh tebalnya tumpukan bahan, RH udara pengering serta kadar air awal bahan. Hal tersebut dapat diatasi dengan cara : (1) mengurangi ketebalan tumpukan bahan, (2) menaikkan kecepatan aliran udara pengering, (3) pengadukan bahan.

Pengeringan yang terlampau cepat dapat merusak bahan, oleh karena permukaan bahan terlalu cepat kering sehingga kurang bisa diimbangi dengan kecepatan gerakan air di dalam bahan yang menuju permukaan bahan tersebut. Adanya pengeringan cepat menyebabkan pengerasan pada permukaan bahan, selanjutnya air di dalam bahan tersebut tidak dapat lagi menguap karena terhambat.

Dalam pengeringan, keseimbangan kadar air menentukan batas akhir dari proses pengeringan. Kelembaban 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. Semakin besar perbedaan suhu antara medium pemanas dengan bahan semakin cepat pindah panas ke bahan dan semakin cepat pula penguapan air dari bahan. Pada proses pengeringan, air dikeluarkan dari bahan dapat berupa uap air. Uap air tersebut harus segera dikeluarkan dari atmosfer di sekitar bahan 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.

## **2.2 Mekanisme Pengeringan**

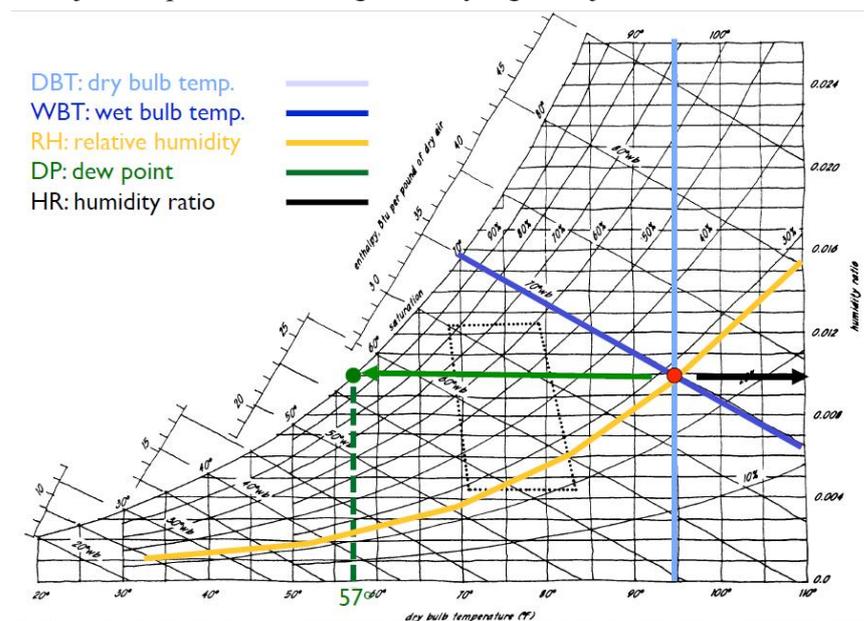
Mekanisme pengeringan diterangkan melalui teori tekanan uap. Air yang diuapkan terdiri dari air bebas dan air terikat. Air bebas berada di permukaan dan yang pertama kali mengalami penguapan. Bila air permukaan telah habis, maka terjadi migrasi air dan uap air dari bagian dalam bahan secara difusi. Migrasi air dan uap terjadi karena perbedaan tekanan uap pada bagian dalam dan bagian luar bahan (Handerson dan Perry, 1976).

Sebelum proses pengeringan berlangsung, tekanan uap air di dalam bahan berada dalam keseimbangan dengan tekanan uap air di udara sekitarnya. Pada saat pengeringan dimulai, uap panas yang dialirkan meliputi permukaan bahan akan

menaikkan tekanan uap air, terutama pada daerah permukaan, sejalan dengan kenaikan suhunya.

Pada saat proses ini terjadi, perpindahan massa dari bahan ke udara dalam bentuk uap air berlangsung atau terjadi pengeringan pada permukaan bahan. Setelah itu tekanan uap air pada permukaan bahan akan menurun. Setelah kenaikan suhu terjadi pada seluruh bagian bahan, maka terjadi pergerakan air secara difusi dari bahan ke permukaannya dan seterusnya proses penguapan pada permukaan bahan diulang lagi. Akhirnya setelah air bahan berkurang, tekanan uap air bahan akan menurun sampai terjadi keseimbangan dengan udara sekitarnya.

Selama proses pengeringan terjadi penurunan suhu bola kering udara, disertai dengan kenaikan kelembaban mutlak, kelembaban nisbi, tekanan uap dan suhu pengembunan udara pengering. Entalpi dan suhu bola basah udara pengering tidak menunjukkan perubahan sebagaimana yang ditunjukkan Gambar 1.



**Gambar 1. Kurva Psikometrik Proses Pengeringan**

*Sumber : Perry's Chemical Handbook, 1989*

### 2.3 Periode Pengeringan

Menurut Henderson dan Perry, proses pengeringan mempunyai dua periode utama yaitu periode pengeringan dengan laju pengeringan tetap dan

periode pengeringan dengan laju pengeringan menurun. Kedua periode utama ini dibatasi oleh kadar air kritis. Pada periode pengeringan dengan laju tetap, bahan mengandung air yang cukup banyak, dimana pada permukaan bahan berlangsung penguapan yang lajunya dapat disamakan dengan laju penguapan pada permukaan air bebas. Laju penguapan sebagian besar tergantung pada keadaan sekeliling bahan, sedangkan pengaruh bahannya sendiri relatif kecil.

Laju pengeringan akan menurun seiring dengan penurunan kadar air selama pengeringan. Jumlah air terikat makin lama semakin berkurang. Perubahan dari laju pengeringan tetap menjadi laju pengeringan menurun untuk bahan yang berbeda akan terjadi pada kadar air yang berbeda pula.

Pada periode laju pengeringan menurun permukaan partikel bahan yang dikeringkan tidak lagi ditutupi oleh lapisan air. Selama periode laju pengeringan menurun, energi panas yang diperoleh bahan digunakan untuk menguapkan sisa air bebas yang sedikit sekali jumlahnya.

Laju pengeringan menurun terjadi setelah laju pengeringan konstan dimana kadar air bahan lebih kecil daripada kadar air kritis. Periode laju pengeringan menurun meliputi dua proses yaitu : perpindahan dari dalam ke permukaan dan perpindahan uap air dari permukaan bahan ke udara sekitarnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

Pada periode laju pengeringan konstan, perhitungannya bisa didasarkan atas perpindahan massa sebagai berikut (Mc Cabe, 1993) :

$$m_v = \frac{h_y (T - T_w) A}{\lambda_w} \dots\dots\dots \text{(pers. 1)}$$

Dimana,  $m_v$  = laju penguapan

$A$  = luas permukaan

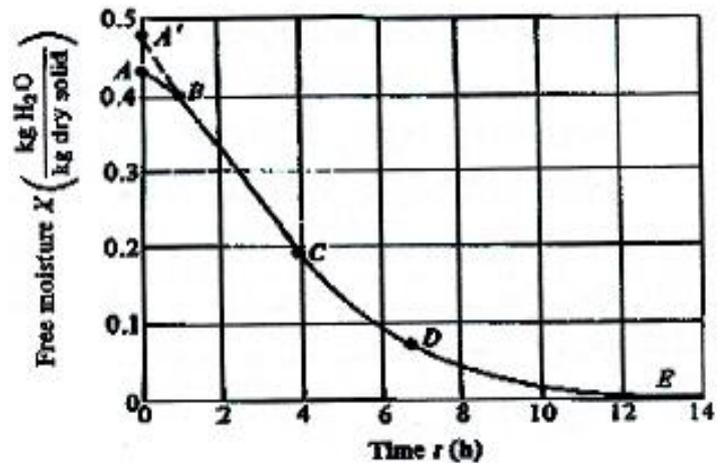
$h_y$  = koefisien perpindahan kalor

$T$  = Temperatur udara  $T_w$  = Temperatur pada permukaan

$\lambda_w$  = panas laten pada suhu  $T_w$

Bila udara mengalir sejajar dengan permukaan zat padat, koefisien perpindahan kalor dapat ditaksir dengan persamaan dimensional (Mc Cabe, 1993) :

$$h_y = 0,0128 G^{0,8} \dots\dots\dots \text{(pers. 2)}$$



**Gambar 2. Hubungan Kadar Air dan Waktu Pengeringan dengan Menggunakan Udara sebagai Media Penghantar Panas**

*Sumber : Anton, Modul Pengeringan, 2011.*

Bila udara mengalir tegak lurus dengan permukaan zat padat, koefisien perpindahan kalor dapat ditaksir dengan persamaan dimensional (Geonkoplis, 1987) :

$$h_y = 0,37 G^{0,37} \dots\dots\dots (\text{pers. 3})$$

Dimana,  $G$  = kecepatan massa, lb/ft<sup>2</sup> jam

Selanjutnya, laju pengeringan konstan,  $R_C$  dapat dihitung dengan rumus (McCabe, 1993) :

$$R_C = \frac{mv}{A} = \frac{h_y (T - T_w)}{\lambda_w} \dots\dots\dots (\text{pers. 4})$$

## 2.4 Mesin Pengering

Mesin pengering merupakan peralatan yang digunakan untuk membantu mempercepat proses pengeringan. Pemilihan mesin pengering dilakukan dari pertimbangan terhadap jenis bahan yang akan dikeringkan, mutu hasil akhir yang dikeringkan dan pertimbangan ekonomi. Pada Tabel 1 ditampilkan tipe-tipe mesin pengering yang umumnya digunakan hingga saat ini.

**Tabel 1. Tipe-tipe Mesin Pengering**

<b>Kriteria</b>	<b>Tipe</b>
Jenis operasi	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Batch</i>. Contoh : <i>try and compartment dryer, through circulation dryer, vacuum tray dryer</i>.</li> <li>2. <i>Continue</i>. Contoh : <i>pneumatic dryer, tunnel dryer, rotary dryer, fluidized bed dryer, drum dryer, cylinder dryer, tray dryer, spray dryer</i>.</li> </ol>
Metode perpindahan panas	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Konduksi. Contoh : <i>belt conveyor dryer, rotary dryer, spray dryer, tray dryer, fluidized bed dryer, through dryer</i>.</li> <li>2. Konveksi. Contoh : <i>drum dryer, vacuum tray dryer, steam jacket rotary dryer</i>.</li> <li>3. Radiasi. Contoh : <i>microwave</i>.</li> </ol>
Tekanan operasi	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Vakum. Contoh : <i>vacuum rotary dryer, vacuum tray dryer, freeze dryer</i>.</li> <li>2. Tekanan atmosfer. Contoh : <i>rotary dryer, tunnel dryer, drum dryer, cylinder dryer, tray dryer, spray dryer</i>.</li> </ol>
Waktu	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Singkat (&lt; 1 menit). Contoh : <i>flash dryer, spray dryer, drum dryer</i>.</li> <li>2. Sedang (1-120 menit). Contoh : <i>belt conveyor dryer, fluidized bed dryer, rotary dryer, tray dryer</i>.</li> <li>3. Panjang (&gt;120 menit). Contoh : <i>tray dryer (batch)</i>.</li> </ol>

Sumber : Jurnal Mujumdar dan Menon, 1995

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa semua tipe pengering tersebut membutuhkan energi yang berupa listrik ataupun bahan bakar fosil. Untuk itulah, pada tahun 2000-an dirancang suatu mesin pengering dengan sumber energi terbarukan yang tidak membutuhkan energi suplai berupa listrik ataupun bahan bakar fosil, yaitu mesin pengering tenaga surya.

Hal yang menjadikan mesin pengering tenaga surya dinilai berpotensi untuk terus dikembangkan adalah fakta bahwa Indonesia terletak pada garis khatulistiwa dan Indonesia mempunyai karakteristik cahaya matahari yang baik (intensitas cahaya tidak fluktuatif) dibanding negara-negara 4 musim. Dalam kondisi puncak atau posisi matahari tegak lurus, sinar matahari yang jatuh di permukaan panel surya di Indonesia seluas 1 m<sup>2</sup> mampu mencapai 900 hingga 1000 Watt. Total intensitas penyinaran perharinya di Indonesia mencapai 4500 watt hour/m<sup>2</sup> yang membuat Indonesia tergolong kaya sumber energi matahari ini

dan matahari di Indonesia mampu bersinar hingga 2.000 jam pertahunnya. (ESDM,2015).

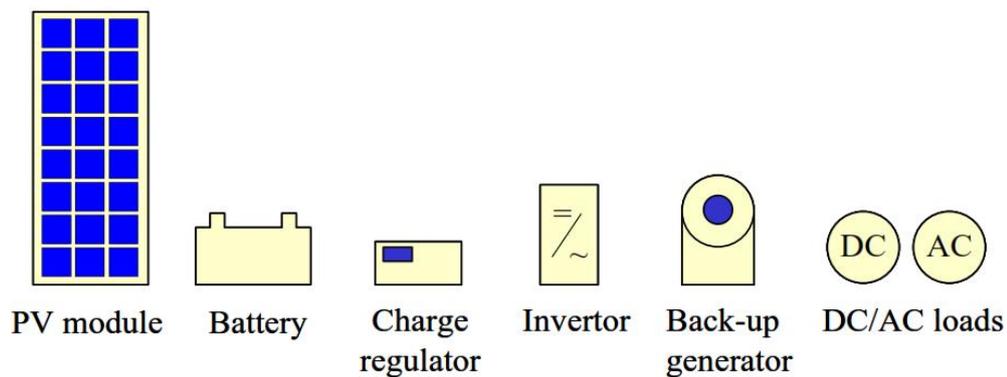
Selain itu jika dibandingkan dengan pengeringan tradisional dimana bahan yang akan dikeringkan berkontak langsung dengan matahari, maka pengeringan dengan menggunakan kolektor surya atau panel surya tentunya lebih menguntungkan. Karena pengeringan tradisional tersebut membutuhkan area yang luas, sulit untuk mengontrol kondisi operasi dan memungkinkan tercemarnya bahan yang akan dikeringkan oleh lingkungan sekitar. Sedangkan pengering tenaga surya dengan menggunakan kolektor surya mampu menyediakan proses pengeringan dengan luas area yang kecil, waktu pengeringan yang singkat, pengaturan kondisi operasi yang bisa disesuaikan dan menghasilkan produk dengan kualitas yang baik (Imre, 2006).

Melihat begitu banyak keuntungan yang dapat diperoleh dari mesin pengering tenaga surya maka mesin tenaga surya ini dapat menjadi pertimbangan dalam pemilihan mesin pengering untuk menghasilkan produk yang berkualitas. Hingga saat ini dalam pemanfaatan energi surya, telah dikembangkan setidaknya dua macam teknologi yang memanfaatkan energi surya sebagai sumber energinya yaitu teknologi energi surya fotovoltaik dan teknologi energi surya termal (Erlinawati, 2013).

#### **2.4.1 Teknologi Energi Surya Fotovoltaik**

Kolektor surya komersial yang umumnya dikenal dunia saat ini adalah modul fotovoltaik. Modul fotovoltaik adalah salah satu bagian dari *PV solar system*. Modul fotovoltaik merupakan bagian inti dari sistem pembangkit tenaga surya, seperti halnya generator yang mengkonversi suatu bentuk energi ke bentuk energi lainnya. Dalam *PV system* dibutuhkan baterai, *charge regulator*, inverter dan beban AC/DC sebagaimana yang dapat dilihat pada Gambar 3 .

Sel surya fotovoltaik adalah peralatan yang mampu mengkonversi langsung cahaya matahari menjadi listrik. Saat kondisi gelap atau tidak cukup cahaya sel surya berfungsi seperti dioda, dan saat disinari dengan cahaya matahari sel surya dapat menghasilkan tegangan.



**Gambar 3. PV Solar system**

*Sumber : Zeman, Miro. 2011. Solar Cells*

Ketika disinari, umumnya satu sel surya komersial menghasilkan tegangan DC sebesar 0,5 sampai 1 volt, dan arus short-circuit dalam skala milliampere per  $\text{cm}^2$ . Besar tegangan dan arus ini tidak cukup untuk berbagai aplikasi, sehingga umumnya sejumlah sel surya disusun secara seri membentuk modul surya. Satu modul surya biasanya terdiri dari 28-36 sel surya, dan total menghasilkan tegangan DC sebesar 12 V dalam kondisi penyinaran standar (Zeman, Miro. 2011). Adapun komponen dari sel surya dijelaskan sebagai berikut:

1. Substrat/*Metal backing*

Substrat adalah material yang menopang seluruh komponen sel surya. Material substrat juga harus mempunyai konduktifitas listrik yang baik karena juga berfungsi sebagai kontak terminal positif sel surya, sehingga umumnya digunakan material metal atau logam seperti aluminium atau molybdenum. Untuk sel surya dye-sensitized (DSSC) dan sel surya organik, substrat juga berfungsi sebagai tempat masuknya cahaya sehingga material yang digunakan yaitu material yang konduktif tapi juga transparan seperti indium tin oxide (ITO) dan flourine doped tin oxide (FTO).

2. Material semikonduktor

Material semikonduktor merupakan bagian inti dari sel surya yang biasanya mempunyai tebal sampai beberapa ratus mikrometer untuk sel

surya generasi pertama (silikon), dan 1-3 mikrometer untuk sel surya lapisan tipis. Material semikonduktor inilah yang berfungsi menyerap cahaya dari sinar matahari. Material semikonduktor yang umum digunakan adalah material silikon, yang umum diaplikasikan di industri elektronik. Bagian semikonduktor tersebut terdiri dari junction atau gabungan dari dua material semikonduktor yaitu semikonduktor tipe-p (material-material yang disebutkan diatas) dan tipe-n (silikon tipe-n, CdS,dll) yang membentuk p-n junction. P-n junction ini menjadi kunci dari prinsip kerja sel surya.

### 3. Kontak metal / *contact grid*

Selain substrat sebagai kontak positif, diatas sebagian material semikonduktor biasanya dilapiskan material metal atau material konduktif transparan sebagai kontak negatif.

### 4. Lapisan antireflektif

Refleksi cahaya harus diminimalisir agar mengoptimalkan cahaya yang terserap oleh semikonduktor. Oleh karena itu biasanya sel surya dilapisi oleh lapisan anti-refleksi. Material anti-refleksi ini adalah lapisan tipis material dengan besar indeks refraktif optik antara semikonduktor dan udara yang menyebabkan cahaya dibelokkan ke arah semikonduktor sehingga meminimumkan cahaya yang dipantulkan kembali.

### 5. Enkapsulasi / *cover glass*

Bagian ini berfungsi sebagai enkapsulasi untuk melindungi modul surya dari hujan atau kotoran.

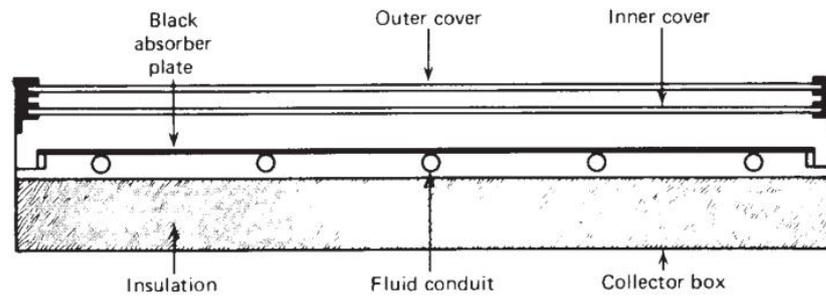
Panel sel surya umumnya mengeluarkan tegangan listrik beraliran DC. Jumlah dan kapasitas panel yang dibutuhkan pada suatu aplikasi tergantung pada beban alat listrik dan intensitas sinar matahari. Standar panel surya yang terdapat di pasar umumnya berkapasitas puluhan sampai dengan ratusan watt (misalnya, 20W, 40W, 80W, 100W, 120W dan seterusnya). Sistem photovoltaik bekerja dengan sistem efek photovoltaik. Efek Photovoltaik merupakan fenomena fisika dimana energi cahaya datang, yang mengenai permukaan sel surya akan diubah

menjadi energi listrik. Arus listrik dapat timbul, karena energi foton cahaya datang berhasil membebaskan elektron-elektron dalam sambungan semi-konduktor tipe n dan tipe p untuk dapat mengalir.

Pada dasarnya, sel surya yang berbasis semi-konduktor silikon cara kerjanya sama dengan perilaku sebuah dioda silikon. Dengan kata lain, sel surya silikon adalah sebuah dioda yang besar. Sel surya photovoltaik terdiri dari wafer tipis lapisan silikon tipe-n ( $n = \text{negatif}$ ) yang dicemari unsur fosfor (phosphor-doped) dan lapisan tebal silikon tipe-p ( $p = \text{positif}$ ) yang tercemar unsur Boron (boron-doped). Lapisan silikon jenis n merupakan semi-konduktor yang berkelebihan elektron sehingga kelebihan muatan negatif. Sedangkan lapisan silikon jenis p merupakan semi-konduktor yang berkelebihan proton (*hole*) sehingga kelebihan muatan positif. Medan listrik timbul dekat permukaan atas sel dimana kedua lapisan p-n tersebut bersentuhan. Ketika photon sinar matahari menyentuh permukaan sel surya tersebut, medan listrik ini memberikan momentum dan pergerakan elektron bebas yang dirangsang oleh photon matahari, sehingga menimbulkan aliran arus ketika sel surya dihubungkan ke beban listrik (Erlinawati, 2013).

#### **2.4.2 Teknologi Energi Kolektor Surya Termal**

Pemanfaatan energi surya oleh manusia secara langsung dalam bentuk pemanasan sudah lama dikenal, misalnya menjemur pakaian, pembuatan garam, pengeringan ikan ataupun produk pangan lainnya. Suhu yang dicapai dengan pemanasan langsung tidak akan melampaui  $100^{\circ}\text{C}$ . pemanfaatan energi surya langsung dapat ditingkatkan dengan menggunakan pengumpul panas yang disebut kolektor. Sistem pemanasan dengan menggunakan kolektor memiliki beragam jenis, seperti dari kolektor cermin pengumpul dan kolektor datar penyerap panas. Sistem pemanasan langsung memiliki efisiensi 30 – 40 % (Erlinawati, 2013). Pada Gambar 4 diperlihatkan salah satu jenis kolektor yang umum digunakan yaitu kolektor surya plat datar.



**Gambar 4. Kolektor Surya Plat Datar**

Sumber : Duffi, A. John. 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes*

Untuk membuat suatu kolektor surya buatan dalam hal ini adalah kolektor surya jenis plat datar, maka perlu dilakukan berbagai pertimbangan seperti bahan pembuat kolektor. Bahan pembuat kolektor pada dasarnya merupakan bahan yang mempunyai kemampuan menyerap kalor. Untuk itu perlu dilakukan pertimbangan dalam pemilihan bahan yang digunakan untuk membuat kolektor surya termal. Salah satu pertimbangan dalam pemilihan bahan adalah dengan melihat nilai konduktifitas bahan tersebut. Pada Tabel 2 diperlihatkan konduktivitas dari berbagai bahan yang dapat digunakan sebagai penyusun kolektor surya termal.

**Tabel 2. Konduktivitas Berbagai Bahan**

Bahan	$k$ (W/m. °C)
Logam	
Perak (murni)	410
Tembaga (murni)	385
Alumunium (murni)	202
Nikel (murni)	93
Besi (murni)	73
Baja carbon, 1% C	43
Timbal (murni)	35
Baja krom-nikel (18% Cr, 8% Ni)	16,3
Bukan Logam	
Kuarsa (sejajar sumbu)	41,6
Magnesit	4,15
Marmar	2,08 – 2,94
Batu pasir	1,83
Kaca, jendela	0,78
Kayu maple atau ek	0,17
Wol kaca	0,038

Sumber : Ari Suryanto, 2012

Bahan logam yang mempunyai kemampuan menyerap kalor adalah logam aluminium berwarna hitam. Dalam hal ini logam yang dipakai adalah plat aluminium yang dicat hitam dan dibawahnya terdapat bahan penyimpan kalor, seperti glass wool ataupun pasir. Nilai konduktivitas bahan berpengaruh terhadap cepat lambatnya kalor yang mengalir di dalam suatu bahan. Semakin tinggi nilai konduktivitas suatu bahan maka semakin cepat pula kalor yang mengalir pada bahan tersebut.

### 2.5 Perpindahan Massa

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. Dalam penelitian ini digunakan kerupuk sebagai bahan yang akan dikeringkan. Besarnya kerupuk kering dengan kadar tertentu dapat dicari dengan rumus sebagai berikut (Trayball, 1981) :

$$M_k = \frac{(100 - m_1)}{100} \times m_b \quad \dots\dots\dots \text{(pers. 5)}$$

Dimana :

$m_k$  = Massa kering (kg)

$m_b$  = Massa basah (kg)

$m_1$  = Kadar air awal (%)

Sedangkan untuk kadar air awal bahan maka dapat digunakan rumus :

$$\text{Kadar air awal} = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100\% \quad \dots\dots\dots \text{(pers. 6)}$$

Dengan  $w_1$  adalah massa awal bahan (kg),  $w_2$  adalah massa akhir bahan/setelah pengeringan (kg).

### 2.6 Perpindahan Panas

Energi matahari yang dipancarkan ke suatu permukaan dapat menyebabkan terjadinya transfer panas. Transfer panas atau perpindahan panas yang terjadi dalam proses pengeringan dapat meliputi konduksi, konveksi, dan radiasi, sebagaimana yang dijelaskan sebagai berikut (Mc Cabe, 1993).

### 2.6.1 Perpindahan Panas Konduksi

Perpindahan panas konduksi secara umum adalah proses dengan panas mengalir dari daerah yang bersuhu lebih tinggi ke daerah yang bersuhu lebih rendah didalam suatu medium (padat, cair atau gas) atau antara medium-medium yang berlainan yang bersinggungan secara langsung. Dalam aliran panas konduksi, perpindahan energi terjadi karena hubungan molekul secara langsung tanpa adanya perpindahan molekul yang cukup besar. Energi yang dimiliki oleh suatu elemen zat yang disebabkan oleh kecepatan posisi relatif molekul-molekulnya disebut energi dalam. Jadi, semakin cepat molekul-molekul bergerak, semakin tinggi suhu meupun energi dalam elemen zat. Bila molekul-molekul di satu daerah memperoleh energi kinetik rata-rata yang lebih besar dari pada yang dimiliki oleh molekul-molekul di suatu daerah yang berdekatan, sebagaimana ditunjukkan oleh adanya beda suhu, maka molekul-molekul yang memiliki energi yang lebih besar itu akan memindahkan sebagian energinya kepada molekul - molekul di daerah yang bersuhu lebih rendah.

Konduksi adalah satu – satunya mekanisme dimana panas dapat mengalir dalam zat padat yang tidak dapat tembus cahaya. Konduksi penting dalam fluida, tetapi di dalam medium yang bukan padat biasanya tergabung dengan konveksi, dan radiasi.

Energi berpindah secara konduksi (*conduction*) atau hantaran dan bahwa laju perpindahan kalor itu berbanding dengan gradien suhu normal (Mc Cabe, 1993):

$$q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \dots\dots\dots \text{(pers. 8)}$$

Dengan :

- Q = Laju perpindahan panas (Watt)
- k = Konduktivitas termal (W/mK)
- A = Luas Penampang yang terletak pada aliran panas (m<sup>2</sup>)
- ΔT = Perbedaan temperatur diantara dua permukaan (K)
- Δx = Tebal permukaan (m)

### 2.6.2 Perpindahan Panas Konveksi

Perpindahan panas secara konveksi bergantung pada nilai koefisien konveksi fluidanya. Konveksi merupakan perpindahan kalor yang disertai dengan perpindahan massa medianya, dan media konveksi adalah fluida. Konveksi terjadi karena adanya perbedaan kecepatan fluida bila suhunya berbeda, yang tentunya akan berakibat pada perbedaan berat jenis (berat tiap satuan volume). Fluida yang bersuhu tinggi akan mempunyai berat jenis yang lebih kecil bila dibandingkan dengan fluida sejenisnya yang bersuhu lebih rendah. Karena itu, maka fluida yang bersuhu tinggi akan naik sambil membawa energi. Hal inilah yang berakibat pada terjadinya perpindahan kalor konveksi. Konveksi adalah proses transfer energi dengan kerja gabungan dari konduksi panas, penyimpanan energi dan gerakan mencampur. Konveksi sangat penting sebagai mekanisme perpindahan energi antara permukaan benda padat dan cairan atau gas.

Perpindahan energi dengan cara konveksi dari suatu permukaan yang suhunya diatas suhu fluida sekitarnya berlangsung dalam beberapa tahap. Pertama, panas akan mengalir dengan cara konduksi dari permukaan ke partikel – partikel fluida yang berbatasan. Energi yang berpindah dengan cara demikian akan menaikkan suhu dan energi dalam partikel fluida ini. Kemudian partikel fluida tersebut akan bergerak ke daerah yang bersuhu lebih rendah di dalam fluida dimana partikel tersebut akan bercampur dan memindahkan sebaian energinya pada partikel fluida lainnya. Dalam hal ini alirannya adalah aliran fluida maupun energi. Energi disimpan didalam partikel – partikel fluida dan diangkut sebagai akibat gerakan massa partikel tersebut.

Perpindahan panas konveksi diklasifikasikan dalam konveksi bebas (*free convection*) dan konveksi paksa (*forced convection*) menurut cara menggerakkan cara alirannya. Bila gerakan mencampur berlangsung semata-mata sebagai akibat dari perbedaan kerapatan yang disebabkan oleh gradient suhu, maka proses ini yang disebut dengan konveksi bebas atau alamiah (*natural*). Bila gerakan mencampur disebabkan oleh suatu alat dari luar, seperti pompa atau kipas, maka prosesnya disebut konveksi paksa. Tabel 2 berikut ini menyajikan data berupa koefisien perpindahan panas secara konveksi.

**Tabel 3. Perpindahan Panas Secara Konveksi**

No	Proses	H (Watt/m <sup>2</sup> K)
1	Konveksi Alami	
	- Gas	2 – 25
	- Cairan	50 – 1000
2	Konveksi Paksa	
	- Gas	25 – 250
	- Cairan	100 – 20.000
3	Konveksi dengan perubahan fasa (mendidih dan mengembun)	2500 – 100.000

Sumber : Suryanto, Ari dkk. 2012. *Modifikasi plat penyerap kalor matahari.*

Perpindahan panas secara konveksi dirumuskan sebagai berikut (Mc Cabe, 1993) :

$$q = HA(T_w - T_\infty) \dots\dots\dots \text{(pers. 9)}$$

Dimana :

H = Koefisien perpindahan kalor konveksi (W/m<sup>2</sup>°C)

A = Luas Penampang yang terletak pada aliran panas (m<sup>2</sup>)

T<sub>w</sub> = Temperatur dinding (°C)

T<sub>f</sub> = Temperatur fluida (°C)

Q = Laju perpindahan panas konveksi (watt)

### 2.6.3 Perpindahan Panas Radiasi

Jika suatu benda ditempatkan di dalam sebuah ruangan, dan suhu dinding – dinding ruangan lebih rendah dari pada suhu benda maka suhu benda tersebut akan turun sekalipun ruangan tersebut ruang hampa. Proses dengan perpindahan panas dari suatu benda terjadi berdasarkan suhunya tanpa bantuan dari suatu zat antara (medium) disebut radiasi termal. Defenisi lain dari radiasi termal ialah radiasi elektromagnetik yang dipancarkan oleh suatu benda karena suhunya.

Radiasi adalah proses perpindahan panas melalui gelombang elektromagnetik atau paket-paket energi (*photon*) yang dapat dibawa sampai pada jarak yang sangat jauh tanpa memerlukan interaksi dengan medium (ini yang menyebabkan mengapa perpindahan panas radiasi sangat penting pada ruang vakum), disamping itu jumlah energi yang dipancarkan sebanding dengan temperatur benda tersebut. Tidak seluruh energi yang disebutkan dalam konstanta

surya mencapai permukaan bumi, karena terdapat absorpsi yang kuat dari karbondioksida dan uap air di atmosfer. Perpindahan panas secara radiasi dapat dirumuskan sebagai berikut (Mc Cabe, 1993) :

$$q_{rad} = \sigma \epsilon (T_1^4 - T_2^4) \dots\dots\dots \text{(pers. 10)}$$

Dimana  $\sigma$  adalah konstanta Stefan-Boltzman dengan nilai  $5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$ ,  $\epsilon$  adalah emisivitas benda dan T adalah beda temperatur.

## 2.7 Perhitungan Neraca Energi

Hal yang perlu diperhatikan dalam perhitungan neraca energi alat pengering tenaga surya adalah penggunaan energinya. Penggunaan energi pada proses pengeringan kerupuk kelempeang dengan menggunakan *dual solar system* meliputi energi dari kolektor termal dan energi dari fotovoltaik.

Data-data input energi yang diperlukan meliputi data radiasi surya dan jumlah energi dari fotovoltik yang digunakan. Sedangkan data output energi berupa massa air yang diuapkan dari bahan, suhu bahan, suhu udara pengering, RH dan kecepatan volumetrik udara pengering.

Pada kondisi *steady state*, energi yang dapat dihasilkan oleh suatu kolektor surya dengan luas permukaan sebesar A, adalah sebagai berikut (Duffi, A. John. 2013)

$$Q = A \times [S - U_L (T_2 - T_1)] \dots\dots\dots \text{(pers. 11)}$$

Dimana,

Q = energi yang dihasilkan kolektor (W)

A = luas permukaan kolektor ( $\text{m}^2$ )

S = energi yang diterima kolektor ( $\text{W/m}^2$ )

$U_L$  = Heat loss ( $\text{W/m}^2 \text{ C}$ )

Energi yang dapat dimanfaatkan kolektor adalah perbedaan antara energi radiasi yang diserap absorber terhadap kerugian termalnya, yang kemudian dapat dihitung dengan menggunakan rumus (Mc Cabe, 1993) :

$$Q_s = \frac{m_b \times c_p \times \Delta T}{t} \dots\dots\dots \text{(pers. 12)}$$

Dimana :

$Q_s$  = Energi untuk menaikkan temperatur bahan (W)

$C_p$  = Kalor jenis bahan ( kJ/kg °C)

$\Delta T$  = Selisih temperatur bahan sebelum dan sesudah pengeringan (°C)

$t$  = Waktu proses pengeringan (s)

$m_b$  = massa basah bahan (kg)

Kalor laten adalah energi yang digunakan untuk mengubah air pada kerupuk menjadi uap. Kalor laten dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut (Mc Cabe, 1993) :

$$Q_s = \frac{m_w \times L_H}{t} \dots\dots\dots \text{(pers. 13)}$$

Dimana :

$Q_L$  = Energi untuk mengeringkan bahan (W)

$t$  = Waktu proses pengeringan (s)

$m_w$  = massa air yang diuapkan (kg)

$L_H$  = Panas laten bahan (kJ/kg)