



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGERINGAN TEMULAWAK DENGAN HEAT PUMP  
DRYING SEDERHANA**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**Abdul Rizal M.**

**0706266784**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JANUARI 2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul:

### PENGERINGAN TEMULAWAK DENGAN HEAT PUMP DRYING SEDERHANA

Yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui, bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Nama : Abdul Rizal M.

NPM : 0706266784

Tanda Tangan

: 

Tanggal : 25 Januari 2012

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Abdul Rizal M.  
NPM : 0706266784  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : Pengeringan Temulawak Dengan Heat Pump  
Drying Sederhana

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Dr. Ir. Muhammad Idrus Alhamid (  )

Pembimbing II : Dr. Ir. Engkos A. Kosasih, M.T. (  )

Penguji : Dr.-Ing. Ir. Nasruddin M.Eng (  )

Penguji : Dr. Ir. Budihardjo, Dipl. Ing (  )

Ditetapkan di : Depok  
Tanggal : 25 Januari 2012

## UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah, Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr. Ir. Muhammad Idrus Alhamid, selaku dosen pembimbing I yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Dr. Ir. Engkos Kosasih, MT., selaku dosen pembimbing II yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini terlebih pada perhitungan dan analisis;
- (3) Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
- (4) Sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini;
- (5) Seluruh staf pengajar Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia yang telah memberikan dan mengajarkan ilmunya, sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini dengan bermacam ilmu yang telah didapat

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 25 Januari 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS  
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Abdul Rizal M.  
NPM : 0706266784  
Program Studi : Teknik Mesin  
Departemen : Teknik Mesin  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**PENGERINGAN TEMULAWAK DENGAN HEAT PUMP DRYING  
SEDERHANA**

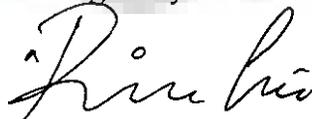
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 25 Januari 2012

Yang menyatakan



(Abdul Rizal M.)

## ABSTRAK

Nama : Abdul Rizal M.  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul : Pengeringan Temulawak Dengan Heat Pump Drying Sederhana

Pengeringan dengan menggunakan *heat pump* (*heat pump drying*, HPD) dikatakan sebagai proses pengeringan yang efisien dan ramah lingkungan, namun masalah teknis ditemukan di lapangan pada fase implementasi yang berujung pada masalah rancangan desain dan konstruksi. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui *kinerja heat pump drying* dan kondisi optimal dengan menggunakan material uji temulawak. Sistem *heat pump drying* menggunakan AC split 1/2PK (refrigeran R22) dan dimensi kabin 197cm x 78.5cm x 107.5cm. Dari hasil pengujian temperatur tetinggi udara panas saat steady dari keluaran kondenser dapat mencapai 48<sup>0</sup>C dengan RH 20% dan nilai kinerja sistem HPD sebesar 1,2.

Kata kunci:

Karakteristik *heat pump*, *heat pump drying*, temulawak, kinerja HPD

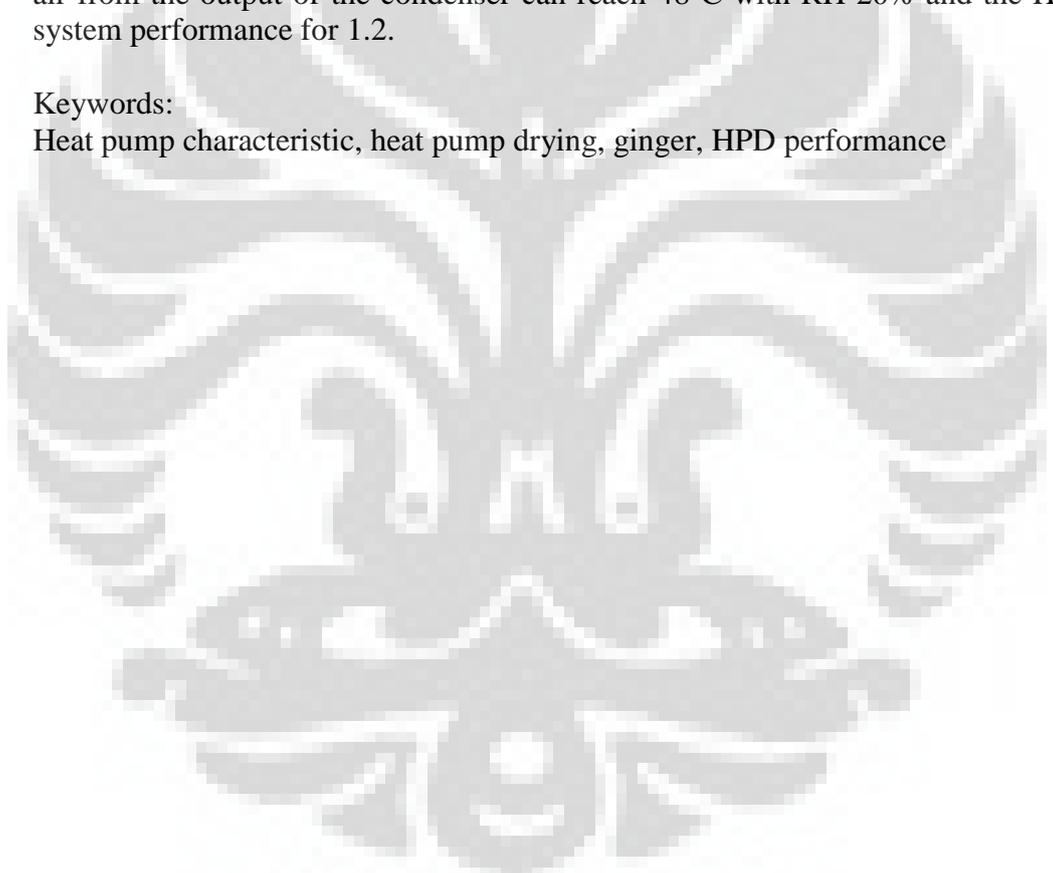
## ABSTRACT

Name : Abdul Rizal M.  
Major : Mechanical Engineering  
Title : Drying Of Cucuma Xanthorrhiza With Single Heat Pump Drying

Drying using a heat pump (heat pump drying, HPD) is said to be the drying process efficient and environmentally friendly, but the technical problems in the field is the implementation phase of the design problems and construction. The study was conducted to determine the performance of heat pump drying and optimum conditions using test materials ginger. Heat pump drying system using a split AC 1/2PK (refrigerant R22) and cabin dimensions 197cm x 78.5cm x 107.5cm. From the test results the highest temperature of the steady current of hot air from the output of the condenser can reach 48<sup>0</sup>C with RH 20% and the HPD system performance for 1.2.

Keywords:

Heat pump characteristic, heat pump drying, ginger, HPD performance



## DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS .....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
DAFTAR NOTASI .....	xiii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 LATAR BELAKANG.....	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH.....	2
1.3 TUJUAN PENELITIAN .....	2
1.4 BATASAN MASALAH .....	2
1.5 METODOLOGI PENELITIAN .....	3
1.6 SISTEMATIKA PENELITIAN .....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1 PENERINGAN.....	5
2.2 PRINSIP DASAR PENERINGAN .....	5
2.3 FAKTOR-FAKTOR PENERINGAN .....	7
2.4 KARAKTERISTIK HIDRATASI (PENGUAPAN AIR).....	9
2.4.1 KADAR AIR.....	9
2.4.2 AKTIVITAS AIR .....	11
2.4.3 KELEMBABAN RELATIF & KELEMBABAN MUTLAK .....	13
2.5 DIAGRAM PSIKROMETRIK .....	14
2.6 PROSES PENERINGAN.....	16

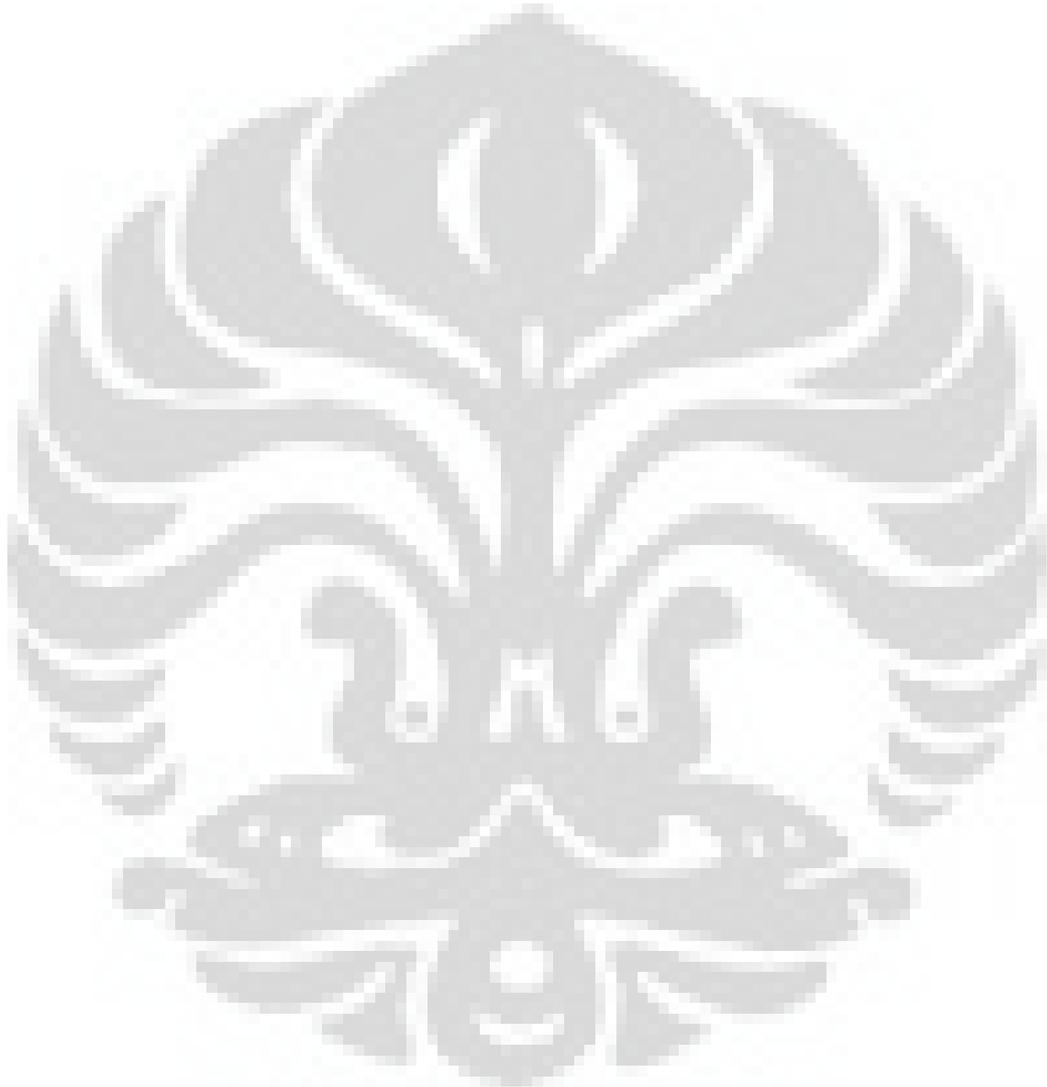
2.7	PERBEDAAN PRINSIP KERJA 3 METODE PENDINGINAN.....	18
2.8	HEAT PUMP DRYING .....	20
2.9	PERFORMA HEAT PUMP DRYING .....	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		23
3.1	TUJUAN PENGUJIAN .....	2
3.2	KOMPONEN PENGUJIAN .....	23
3.2.1	MODEL KABIN.....	23
3.2.2	THERMOHYGROMETER DIGITAL.....	24
3.2.3	AC SPLIT CHANG-HONG TIPE STANDAR CSC (1/2 PK).....	25
3.2.4	TIMBANGAN DIGITAL .....	25
3.2.5	TEMULAWAK.....	26
3.3	VARIASI PENGAMBILAN DATA.....	27
3.4	PROSEDUR PENGAMBILAN DATA .....	27
BAB IV PEMBAHASAN.....		29
4.1	ANALISIS PERHITUNGAN .....	33
4.1.1	MASSA BALANCE .....	34
4.1.2	ENERGY BALANCE.....	35
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....		37
5.1	KESIMPULAN .....	37
5.2	SARAN.....	37
DAFTAR REFERENSI .....		xii

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1	Air bergerak melalui celah kapiler bahan .....6
Gambar 2.2	Bahan menyerap suhu disekeliling .....7
Gambar 2.3	Arah kecepatan udara saat pengeringan .....8
Gambar 2.4	Aktivitas air vs kadar air berbagai jenis makanan.....12
Gambar 2.5	Diagram Psikrometrik .....14
Gambar 2.6	Garis Jenuh .....15
Gambar 2.7	Grafik periode dari pengeringan .....17
Gambar 2.8	Skema Heat Pump Drying .....19
Gambar 3.1	Kabinet Heat Pump Drying .....23
Gambar 3.2	Thermohygrometer Digital .....24
Gambar 3.3	AC Split Chang –Hong ½ Pk .....25
Gambar 3.4	Timbangan Digital .....26
Gambar 3.5	Temulawak .....26
Gambar 3.6	Skema Pengujian Heat Pump Drying, HPD .....28
Gambar 4.1	Grafik temperatur dengan beban .....29
Gambar 4.2	Grafik R.H dengan beban .....30
Gambar 4.3	Grafik temperatur tanpa beban .....30
Gambar 4.4	Grafik R.H tanpa beban .....31
Gambar 4.5	Temulawak hasil pengeringan dengan HPD & oven .....31
Gambar 4.6	Grafik laju pengeringan bahan .....32
Gambar 4.7	Grafik penurunan massa bahan .....33
Gambar 4.8	Skema analisis perhitungan HPD .....33
Gambar 4.9	Grafik laju pengeringan terhadap waktu .....35
Gambar 4.10	Grafik laju kinerja HPD .....36

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran.....	xiii



## DAFTAR NOTASI

$m_0$  = Massa awal bahan (g)

$m_t$  = Massa akhir bahan (g)

$\Delta t$  = Selang waktu pengeringan (m)

$\omega_i$  = Masa uap air per massa udara kering masuk ( $\frac{g}{kg}$ )

$\omega_o$  = Masa uap air per massa udara kering keluar ( $\frac{g}{kg}$ )

$\dot{m}_i$  = Laju udara masuk ( $\frac{g}{m}$ )

$\dot{m}_o$  = Laju udara keluar ( $\frac{g}{m}$ )

$\omega_i$  = Masa uap air per massa udara kering masuk ( $\frac{g}{kg}$ )

$\omega_o$  = Masa uap air per massa udara kering keluar ( $\frac{g}{kg}$ )

$h_i$  = entalpi masuk ( $\frac{kJ}{kg}$ )

$h_o$  = entalpi keluar ( $\frac{kJ}{kg}$ )

$h_w$  = Kalor laten air ( $\frac{kJ}{kg}$ )

$Q_{cond}$  = Kalor yang diberikan kondesator (Watt)

$Q_{evap}$  = Kalor yang dilepaskan evaporator (Watt)

$P_{comp}$  = Daya kompresor (Watt)

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 LATAR BELAKANG

Proses pengeringan adalah suatu unit operasi yang sangat penting di sektor industri dan sudah sejak lama dikenal dan berkembang, tetapi tantangan di dalam desain dan konstruksi masih tetap terus ada (Strommen T. et al, 1999). Sedangkan teknologi *dehumidifier heat pump* yang identik dengan teknologi AC (*air condition*) adalah juga teknologi yang sudah berkembang dan relatif mapan, tetapi apabila teknologi pengeringan digabungkan dengan teknologi *heat pump* akan menghasilkan suatu sistem yang kompleks karena semua komponennya saling ketergantungan satu sama lain, perubahan di dalam suatu komponen akan mempengaruhi komponen lainnya (Prasertsant S., 1996).

Dalam dunia industri, sistem pengeringan memiliki peranan yang sangat penting. Sistem pengeringan dalam aplikasinya dapat dilakukan dengan cara yang berbeda-beda, tergantung pada kebutuhan dimana sistem tersebut diterapkan. Pada industri jamu (tanaman obat) proses pengeringan dilakukan dengan tujuan untuk mengurangi kadar air, sehingga mencegah terjadinya pembusukan oleh cendawan atau bakteri. Dengan demikian, bahan dapat lebih tahan lama disimpan, tanpa mengurangi penurunan mutu sebelum diolah lebih lanjut, memudahkan dalam pengangkutan, dan menimbulkan aroma khas pada bahan serta memiliki nilai ekonomi lebih tinggi. Bahan yang telah kering, juga lebih mudah dihaluskan bila ingin dibuat serbuk.

Di negara maju teknologi proses pengering *heat pump* (*heat pump drying*, HPD) dikatakan sebagai proses pengeringan yang efisien dan ramah lingkungan, relatif berbeda dengan proses pengeringan konvensional yang menggunakan minyak bumi atau biomass untuk membangkitkan energi termal, yakni relatif boros dengan efisiensi energi dibawah 50% dan bahkan sering mencapai 10%–20% (Energy Group New Zealand, 2001). Tetapi penggunaan pengering proses

*heat pump* di dalam negeri masih relatif sedikit baik pada industri skala besar maupun industri skala kecil, kemungkinan karena masih banyaknya masalah teknis ditemukan di lapangan pada fase implementasi yang berhulu pada masalah rancangan desain dan konstruksi.

Oleh karena itu, maka dilakukanlah perancangan dan pengujian alat pengering dengan menggunakan *heat pump*. Pada alat pengering HPD akan dipasang dua fan yg masing-masing berfungsi untuk memasukan udara segar ke dalam kabin (*fresh air*) dan mengeluarkan udara panas berlebih (*hot air*). Kemudian akan dilihat karakteristik alat pengering HPD yang akan diuji tanpa atau dengan menggunakan material uji berupa temulawak.

## **1.2 PERUMUSAN MASALAH**

Berdasarkan latar belakang di atas, maka penelitian ini dirumuskan dengan melakukan perancangan *heat pump drying* dan pengukuran temperatur, RH, massa bahan, serta massa air kondensat untuk mengetahui unjuk kerja alat tersebut. Adapun variasi pengukuran dalam penelitian ini ialah dengan dan tanpa menggunakan beban, berupa temulawak.

Hasil pengukuran yang didapat berupa grafik unjuk kerja dari alat HPD (*Heat Pump Drying*) yang merepresentasikan laju pengeringannya.

## **1.3 TUJUAN PENELITIAN**

Secara umum penelitian ini bertujuan:

1. Mengetahui karakteristik *heat pump drying* dengan melihat parameter temperatur, RH, massa bahan, dan massa air kondensat dari evaporator.
2. Melihat seberapa cepat pengeringan yang dilakukan pada sampel berupa temulawak.

## **1.4 BATASAN MASALAH**

Pembatasan masalah pada penelitian ini meliputi:

1. Pengujian dilakukan pada kondisi kerja maksimum kondenser, yaitu dengan mengatur temperatur terendah di evaporator pada 16<sup>0</sup>C.
2. Mengukur temperatur dan RH pada HPD (*heat pump drying*) dalam kompartemen berukuran 197 x 78.5 x 107.5 cm dengan dan tanpa beban.

3. Menggunakan temulawak sebagai beban kerja alat HPD sebanyak 0,95 kg yang dibagi menjadi dua bagian yg sama besar dan ditempatkan dalam dua tempat terpisah (rak 1 dan rak 2).
4. Mengukur pengurangan massa bahan sebagai parameter pengurangan uap air pada bahan.
5. Mengukur massa air kondensat dengan dan tanpa beban untuk melihat seberapa besar uap air yang dikeluarkan dari bahan.
6. Fan *fresh air* dan *hot air* dinyalakan ketika  $RH \leq 25\%$
7. *Heat pump* yang digunakan adalah AC split merek Changhong tipe standar model CSC 05Y3(½ PK)

## 1.5 METODOLOGI PENELITIAN

Metode yang dilakukan dalam penulisan tugas akhir ini adalah dengan melakukan studi literatur, dan melakukan pengujian dari perancangan alat HPD (*heat pump drying*).

### 1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mencari teori-teori dasar pada jurnal, skripsi, artikel-artikel di internet yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan.

### 2. Pengujian Alat

Pengujian dilakukan untuk mengukur temperatur, RH, massa bahan, dan massa air kondensat. Pengujian dilakukan di Laboratorium Perpindahan Panas Departemen Teknik Mesin FTUI dengan variasi tanpa dan dengan beban kerja berupa temulawak.

### 3. Analisa dan Kesimpulan Hasil Pengujian

Analisa terhadap hasil pengukuran akan disajikan dalam grafik temperatur, RH, laju pengeringan bahan, dan penurunan massa bahan masing-masing terhadap waktu.

### 4. Kesimpulan

Pengambilan kesimpulan akhir dari keseluruhan kegiatan penelitian ini yang dibuat mengacu kepada tujuan penelitian.

## **1.6 SISTEMATIKA PENULISAN**

Adapun sistematika penulisan skripsi ini dilakukan menurut bab-bab sebagai berikut:

### **BAB 1 PENDAHULUAN**

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang dan tujuan penulisan, pembatasan masalah, metode penulisan dan sistematika penulisan.

### **BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab ini disampaikan teori-teori yang menjelaskan tentang pengeringan dan *teori heat pump drying* (HPD), serta dasar teori dalam melakukan analisa.

### **BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini menjelaskan mengenai rangkain alat, skema alat, prosedur pengujian, hasil pengujian.

### **BAB 4 DATA DAN ANALISA**

Bab ini membahas mengenai mengolah dan menganalisa data yang telah diperoleh pada saat pengujian.

### **BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN**

Pada bab ini mengutarakan kesimpulan dan saran yang didapat setelah melakukan percobaan.

### **DAFTAR REFERENSI**

### **LAMPIRAN**

Berisikan data pengujian dan pengolahan, tabel dan grafik.

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Pengertian Pengeringan**

Pengeringan adalah proses pengeluaran air atau pemisahan air dalam jumlah yang relatif kecil dari bahan dengan menggunakan energi panas. Hasil dari proses pengeringan adalah bahan kering yang mempunyai kadar air setara dengan kadar air keseimbangan udara (atmosfir) normal atau setara dengan nilai aktivitas air (aw) yang aman dari kerusakan mikrobiologis, enzimatik dan kimiawi.

**Pengeringan** adalah suatu peristiwa perpindahan massa dan energi yang terjadi dalam pemisahan cairan atau kelembaban dari suatu bahan sampai batas kandungan air yang ditentukan dengan menggunakan gas sebagai fluida sumber panas dan penerima uap cairan (*Treybal, 1980*).

Pengeringan merupakan proses penghilangan sejumlah air dari material. Dalam pengeringan, air dihilangkan dengan prinsip perbedaan kelembaban antara udara pengering dengan bahan makanan yang dikeringkan. Material biasanya dikontakkan dengan udara kering yang kemudian terjadi perpindahan massa air dari material ke udara pengering.

Menurut Brennan (1978), pengeringan atau dehidrasi didefinisikan sebagai pengurangan kandungan air oleh panas buatan dengan kondisi suhu, RH, dan aliran udara terkontrol. Tujuan utama dari pengeringan atau dehidrasi adalah untuk mengurangi kandungan air tanpa merusak struktur produk.

Pengeringan merupakan salah satu proses pengolahan pangan yang sudah lama dikenal. Banyak bahan hasil pertanian yang hanya digunakan setelah dikeringkan terlebih dahulu seperti tembakau, kopi, dan biji-bijian. Meskipun demikian ada kerugian yang ditimbulkan selama pengeringan yaitu terjadinya perubahan sifat fisik dan kimiawi bahan serta terjadinya penurunan mutu bahan.

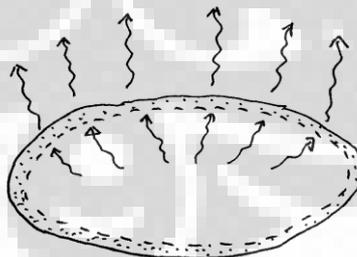
#### **2.2 Prinsip Dasar Pengeringan**

Proses pengeringan pada prinsipnya menyangkut proses perpindahan panas dan massa yang terjadi secara bersamaan (simultan). Pertama-tama panas harus ditransfer dari medium pemanas ke bahan. Selanjutnya setelah terjadi penguapan

air, uap air yang terbentuk harus dipindahkan melalui struktur bahan ke medium sekitarnya. Proses ini akan menyangkut aliran fluida dengan cairan harus ditransfer melalui struktur bahan selama proses pengeringan berlangsung. Jadi panas harus disediakan untuk menguapkan air dan air harus mendifusi melalui berbagai macam tahanan agar supaya dapat lepas dari bahan dan berbentuk uap air yang bebas.

Dalam beberapa kasus, air dihilangkan secara mekanik dari material padat dengan cara di-*press*, sentrifugasi dan lain sebagainya. Cara ini lebih murah dibandingkan pengeringan dengan menggunakan panas. Kandungan air dari bahan yang sudah dikeringkan bervariasi bergantung dari produk yang ingin dihasilkan. Garam kering mengandung 0.5% air, batu bara mengandung 4% air dan produk makanan mengandung sekitar 5% air. Biasanya pengeringan merupakan proses akhir sebelum pengemasan dan membuat beberapa benda lebih mudah untuk ditangani. Pengeringan merupakan metode tertua yang dilakukan manusia dalam usahanya untuk mengawetkan makanan, yang hingga kini metode tersebut masih digunakan (Brennan, 1978).

Brooker dkk (1992) menyatakan bahwa pengeringan merupakan proses perpindahan panas dari media pengering ke dalam bahan yang akan dikeringkan dan proses penguapan kandungan air dari bahan yang dikeringkan ke media pengering (udara) yang terjadi secara simultan.



Gambar 2.1. Air bergerak melalui celah kapiler bahan

Gambar 2.1 memperlihatkan mekanisme keluarnya air dari dalam bahan selama pengeringan yakni:

1. Air bergerak melalui tekanan kapiler.

2. Penarikan air disebabkan oleh perbedaan konsentrasi larutan disetiap 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.

### 2.2.1 Prinsip Dasar Keseimbangan Massa

Di dalam hukum konservatif kekekalan massa diketahui bahwa materi tidak dapat diciptakan atau dihilangkan, tetapi hanya berubah bentuk dari satu wujud ke wujud lainnya. Prinsip ini pun berlaku dalam proses pengolahan pangan, dimana total input bahan yang masuk ke dalam suatu proses pengolahan akan sama dengan total outputnya, yang terjadi adalah perubahan wujud dari bahan yang masuk dan yang keluar. Prinsip ini dikenal dengan istilah keseimbangan massa/materi (*mass/material balance*).

Prinsip keseimbangan massa/materi banyak diaplikasikan dalam mendisain suatu proses pengolahan pangan (pengupasan, sortasi, ekstraksi, pengeringan, evaporasi, dsb) atau formulas! produk baru. Prinsip dari keseimbangan massa adalah total berat yang masuk (input) ke dalam suatu tahap proses atau proses keseluruhan akan sama dengan total berat dari outputnya. Perubahan yang terjadi adalah perubahan wujud dari input menjadi bentuk lainnya. Masukkan bahan yang masuk ke dalam suatu tahap proses dapat berupa satu jenis bahan atau lebih, begitu juga bahan yang keluar dapat berupa satu atau lebih produk yang dikehendaki, limbah (*waste*), ataupun kehilangan yang tidak terkontrol.

Dalam suatu proses apapun jika tidak ada akumulasi dalam peralatan prosesnya, maka jumlah bahan yang masuk akan sama dengan jumlah yang keluar. Dengan kata lain, dalam suatu sistem apapun jumlah materi dalam sistem akan tetap walaupun terjadi perubahan bentuk atau keadaan fisik. Oleh sebab itu, jumlah bahan yang masuk dalam suatu proses pengolahan pangan jumlahnya akan sama dengan jumlah bahan yang keluar sebagai produk yang dikehendaki ditambah jumlah yang hilang dan yang terakumulasi dalam peralatan pengolahan.

Secara matematis, prinsip kesetimbangan massa tersebut dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ( $m$  adalah total massa):

$$m = m_{input} - m_{output} + m_{akumulasi}$$

Proses pengolahan yang tidak mengalami akumulasi disebut "*steady state process*", sedangkan yang mengalami akumulasi disebut "*unsteady state process*". Pembahasan kesetimbangan massa berikut mengasumsikan tidak terjadinya akumulasi dalam peralatan proses (*steady state process*).

### 2.2.1 Aplikasi Kesetimbangan Massa

Untuk dapat melakukan evaluasi kesetimbangan massa dalam suatu tahap proses pengolahan atau keseluruhan proses, maka perlu dilakukan identifikasi dan spesifikasi seluruh materi yang masuk ke dalam proses tersebut dan dimasukkan dalam perhitungan. Prinsip ini dapat digunakan dalam menghitung rendemen dari proses ekstraksi atau sortasi, proporsi campuran bahan dalam suatu formulasi, kehilangan dalam proses, komposisi bahan awal dan akhir, dan sebagainya.

Dalam proses pengeringan, misalnya, yang terjadi adalah pengeluaran air dari bahan pangan. Dalam hal ini, bahan basah dimasukkan ke dalam sistem pengeringan, kemudian air akan dibawa oleh udara pengering menjadi fase uap, dan setelah pengeringan keluar bahan kering yang sudah berkurang kadar air-nya. Sesuai prinsip kesetimbangan massa, maka berat bahan basah yang masuk ke dalam pengering seharusnya sama dengan jumlah uap *air yang keluar* dan berat bahan keringnya. Hal yang sama terjadi di dalam proses evaporasi, dimana ada bagian dari bahan yang dihilangkan dengan proses penguapan sehingga diperoleh produk dengan kepekatan yang lebih tinggi dibanding bahan awalnya.

Dalam proses pengolahan pangan, untuk menghasilkan suatu produk akhir sering harus melalui beberapa tahapan proses. Dengan demikian dalam satu proses pengolahan pangan sendiri sebetulnya terdiri dari sub-sub proses dimana masing-masing sub proses mempunyai kesetimbangan massa sendiri-sendiri.

### 2.2.2 Prinsip Dasar Keseimbangan Energi

Keseimbangan energi pada suatu sistem didasarkan pada prinsip/hukum kekekalan energi, yaitu bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan. Keseimbangan energi akan berkisnambungan dengan prinsip keseimbangan massa, sehingga prinsip perhitungan yang digunakan keseimbangan energi mirip dengan keseimbangan massa.

Perhitungan keseimbangan panas hampir sama dengan keseimbangan massa, dimana jumlah panas yang masuk ke dalam sistem harus sama dengan panas yang meninggalkan sistem. Seperti halnya perhitungan keseimbangan massa, penyelesaian masalah keseimbangan panas juga akan lebih mudah diilustrasikan dalam bentuk diagram aliran proses yang melibatkan panas, mulai dari panas masuk ke dalam sistem hingga meninggalkan sistem. Secara sederhana, prinsip dasar dari keseimbangan energi dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\text{Energi yang masuk} = \text{energi keluar} + \text{akumulasi di dalam sistem}$$

Dalam kondisi *steady state* dimana tidak terjadi akumulasi energi di dalam sistem, maka persamaan di atas dapat disederhankan lagi sebagai berikut:

$$\text{Energi yang masuk} = \text{energi yang keluar}$$

### 2.3 Faktor-faktor Pengerinan

Faktor-faktor yang mempengaruhi dalam kecepatan pengerinan ialah;

a) Luas Permukaan

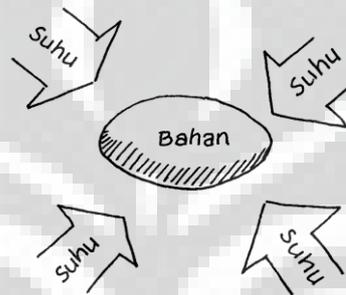
Air menguap melalui permukaan bahan, sedangkan air yang ada di bagian tengah akan merembes ke bagian permukaan dan kemudian menguap. Untuk mempercepat pengerinan umumnya bahan pangan yang akan dikeringkan dipotong-potong atau diiris-iris terlebih dulu. Hal ini terjadi karena:

- Pemotongan atau pengirisan tersebut akan memperluas permukaan bahan dan permukaan yang luas dapat berhubungan dengan medium pemanasan sehingga air mudah keluar,

- Potongan-potongan kecil atau lapisan yang tipis mengurangi jarak dimana panas harus bergerak sampai ke pusat bahan pangan. Potongan kecil juga akan mengurangi jarak melalui massa air dari pusat bahan yang harus keluar ke permukaan bahan dan kemudian keluar dari bahan tersebut.

b) Perbedaan Suhu dan Udara Sekitarnya

Semakin besar perbedaan suhu antara medium pemanas dengan bahan pangan makin cepat pemindahan panas ke dalam bahan dan makin cepat pula penghilangan air dari bahan. Air yang keluar dari bahan yang dikeringkan akan menjenuhkan udara sehingga kemampuannya untuk menyingkirkan air berkurang.

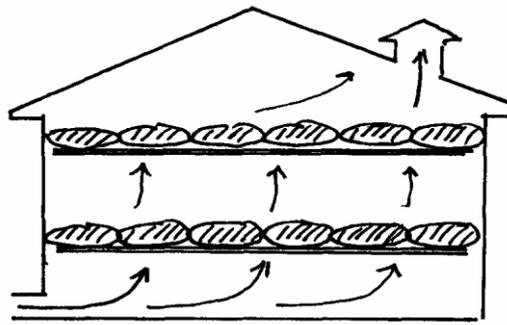


Gambar 2.2. Bahan menyerap suhu di sekitarnya

Jadi dengan semakin tinggi suhu pengeringan maka proses pengeringan akan semakin cepat. Akan tetapi bila tidak sesuai dengan bahan yang dikeringkan, akibatnya akan terjadi suatu peristiwa yang disebut "*Case Hardening*", yaitu suatu keadaan dimana bagian luar bahan sudah kering sedangkan bagian dalamnya masih basah.

c) Kecepatan Aliran Udara

Udara yang bergerak dan mempunyai gerakan yang tinggi selain dapat mengambil uap air juga akan menghilangkan uap air tersebut dari permukaan bahan pangan. Apabila aliran udara disekitar tempat pengeringan berjalan dengan baik, proses pengeringan akan semakin cepat, yaitu semakin mudah dan semakin cepat uap air terbawa dan teruapkan.



Gambar 2.3. Arah kecepatan udara saat pengeringan

d) Tekanan Udara

Semakin kecil tekanan udara akan semakin besar kemampuan udara untuk mengangkut air selama pengeringan, karena dengan semakin kecilnya tekanan berarti kerapatan udara makin berkurang sehingga uap air dapat lebih banyak tetampung dan disingkirkan dari bahan pangan. Sebaliknya jika tekanan udara semakin besar maka udara disekitar pengeringan akan lembab, sehingga kemampuan menampung uap air terbatas dan menghambat proses atau laju pengeringan.

Menurut Earle (1983), faktor-faktor utama yang mempengaruhi kecepatan pengeringan dari suatu bahan pangan adalah :

- a) Sifat fisik dan kimia dari produk (bentuk, ukuran, komposisi, kadar air).
- b) Pengaturan geometris produk sehubungan dengan permukaan alat atau media perantara pemindah panas (seperti nampan untuk pengeringan).
- c) Sifat-sifat fisik dari lingkungan alat pengering (suhu, kelembaban, dan kecepatan udara).
- d) Karakteristik alat pengering (efisiensi pemindahan panas).

#### 2.4 Karakteristik Hidratasi (Penguapan Air)

Karena proses utama dalam pengeringan adalah proses penguapan air, maka perlu terlebih dahulu diketahui karakteristik hidratasi bahan pangan yaitu sifat-sifat bahan yang meliputi interaksi antara bahan pangan dengan molekul air yang dikandungnya dan molekul air di udara sekitarnya. Peranan air dalam bahan pangan dinyatakan dengan kadar air dan aktivitas air ( $a_w$ ), sedangkan peranan air di udara dinyatakan dengan kelembaban relatif (RH) dan kelembaban mutlak (H).

### 2.4.1 Kadar Air

Kadar air suatu bahan menunjukkan banyaknya kandungan air persatuan bobot bahan yang dapat dinyatakan dalam persen berat basah (*wet basis*) atau dalam persen berat kering (*dry basis*). Kadar air berat basah mempunyai batas maksimum teoritis sebesar 100 %, sedangkan kadar air berat kering dapat lebih dari 100 %. Kadar air berat basah (b.b) adalah perbandingan antara berat air yang ada dalam bahan dengan berat total bahan. Kadar air berat basah dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$m = \frac{W_m}{W_t + W_d} \times 100\% = \frac{W_m}{W_t} \times 100\% \quad (2.1)$$

dengan :

$m$  = kadar air berat basah (% b.b)

$W_m$  = berat air dalam bahan (g)

$W_d$  = berat padatan dalam bahan (g) atau berat bahan kering mutlak

$W_t$  = berat total (g)

Kadar air berat kering (b.k) adalah perbandingan antara berat air yang ada dalam bahan dengan berat padatan yang ada dalam bahan. Kadar air berat kering dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$M = \frac{W_m}{W_d} \times 100\%$$

dengan :

$M$  = kadar air berat kering (% b.k)

$W_m$  = berat air dalam bahan (g)

$W_d$  = berat padatan dalam bahan (g) atau berat bahan kering mutlak

Berat bahan kering mutlak adalah berat bahan setelah mengalami pengeringan dalam waktu tertentu sehingga beratnya konstan. Pada proses pengeringan, air yang terkandung dalam bahan tidak dapat seluruhnya diuapkan, meskipun demikian hasil yang diperoleh disebut juga sebagai berat bahan kering.

Di dalam analisis bahan pangan, biasanya kadar air bahan dinyatakan dalam persen berat kering. Hal ini disebabkan perhitungan berdasarkan berat basah mempunyai kelemahan yaitu berat basah bahan selalu berubah-ubah setiap saat, sedangkan berat bahan kering selalu tetap. Metode pengukuran kadar air yang umum dilakukan di Laboratorium adalah metode oven atau dengan cara destilasi.

Pengukuran kadar air secara praktis di lapangan dapat dilakukan dengan menggunakan moisture meter yaitu alat pengukur kadar air secara elektronik.

Kandungan air pada suatu bahan hasil pertanian terdiri dari 3 jenis yaitu :

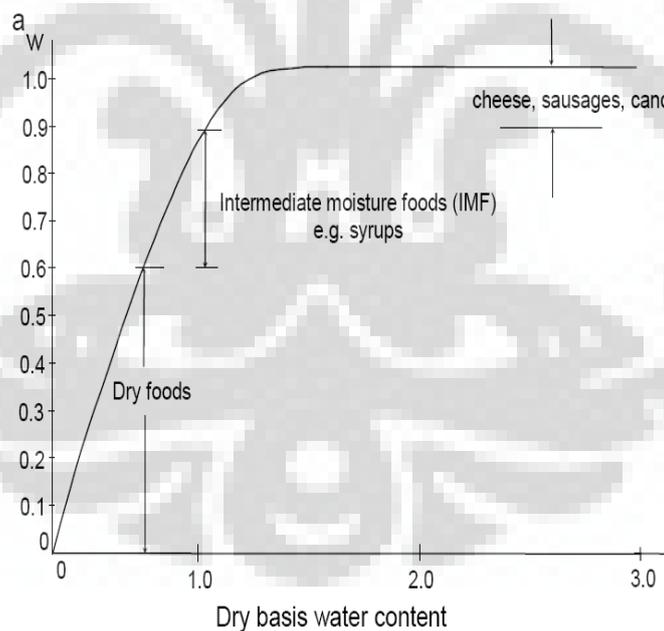
- Air bebas (*free water*). Air ini terdapat pada permukaan bahan, sehingga dapat digunakan oleh mikroorganisme untuk pertumbuhannya serta dapat dijadikan sebagai media reaksi-reaksi kimia. Air bebas dapat dengan mudah diuapkan pada proses pengeringan. Bila air bebas ini diuapkan seluruhnya, maka kadar air bahan akan berkisar antara 12 % sampai 25 %.
- Air terikat secara fisik. Air jenis ini merupakan bagian air yang terdapat dalam jaringan matriks bahan (tenunan bahan) akibat adanya ikatan fisik. Air jenis ini terdiri atas :
  - Air terikat menurut sistem kapiler yang ada dalam bahan karena adanya pipa-pipa kapiler pada bahan.
  - Air absorpsi yang terdapat pada tenunan-tenunan bahan karena adanya tenaga penyerapan dari dalam bahan.
  - Air yang terkurung di antara tenunan bahan karena adanya hambatan mekanis dan biasanya terdapat pada bahan yang berserat.
- Air terikat secara kimia. Untuk menguapkan air jenis ini pada proses pengeringan diperlukan energi yang besar. Air yang terikat secara kimia terdiri atas :
  - Air yang terikat sebagai air kristal.
  - Air yang terikat dalam sistem dispersi koloidal yang terdiri dari partikel-partikel yang mempunyai bentuk dan ukuran beragam.

Partikel-partikel ini ada yang bermuatan listrik positif atau negatif sehingga dapat saling tarik menarik. Kekuatan ikatan yang ada dalam ketiga jenis air tersebut berbeda-beda dan untuk memutuskan ikatannya diperlukan energi

penguapan. Besarnya energi penguapan untuk air bebas paling rendah, kemudian diikuti oleh air terikat secara fisik dan air terikat secara kimia yang paling besar.

### 2.4.2 Aktivitas Air

Dalam bahan hasil pertanian, peranan air yang utama adalah sebagai pelarut yang digunakan selama proses metabolisme. Tingkat mobilitas dan peranan air bagi proses kehidupan biasanya dinyatakan dengan besaran aktivitas air (water activity = aw) yang ada dalam rentang 0 sampai 1. Menurut Winarno (1984) kandungan air pada bahan hasil pertanian akan berpengaruh terhadap daya tahan bahan tersebut dari serangan mikroorganisme. Aktivitas air merupakan salah satu parameter hidrasi yang sering diartikan sebagai jumlah air bebas dalam bahan yang dapat digunakan untuk pertumbuhan mikroorganisme. Setiap mikroorganisme hanya dapat tumbuh pada kisaran aw tertentu seperti aw untuk pertumbuhan bakteri 0,90, khamir 0,80 - 0,90 dan kapang 0,60 - 0,70.



Gambar 2.4. Aktifitas air vs kadar air berbagai macam jenis makanan

Oleh karena itu untuk mencegah pertumbuhan mikrobia, aktifitas air pada bahan harus diatur. Istilah aktivitas air digunakan untuk menjabarkan air yang

terikat atau air bebas dalam suatu sistem yang dapat menunjang reaksi biologis dan kimiawi. Air yang terkandung dalam bahan pangan apabila terikat kuat dengan komponen bukan air, maka akan lebih sukar untuk digunakan dalam aktivitas biologis maupun aktivitas kimia hidrolitik. Menurut Hukum Raoult, aktivitas air berbanding lurus dengan jumlah mol pelarut dan berbanding terbalik dengan jumlah mol di dalam larutan.

$$a_w = \frac{n_1}{n_1 + n_2}$$

dengan :

$n_1$  = jumlah mol pelarut

$n_2$  = jumlah mol zat terlarut

$n_1 + n_2$  = jumlah mol larutan

### 2.4.3 Kelembaban Relatif dan Kelembaban Mutlak

Kelembaban relatif atau kelembaban nisbi didefinisikan sebagai perbandingan antara tekanan parsial uap air yang ada di udara dengan tekanan uap jenuh pada suhu yang sama.

$$RH = \left[ \frac{P}{P_s} \right] \times 100\%$$

dengan :

RH = Kelembaban Relatif (%)

P = Tekanan parsial uap air pada suhu T ( atm)

$P_s$  = Tekanan uap air jenuh pada suhu T (atm)

T = Suhu atmosfer ( $^{\circ}$  C)

Dalam keadaan setimbang dengan bahan pangan, maka hubungan antara aktivitas air dengan kelembaban relatif dapat ditulis sebagai berikut :

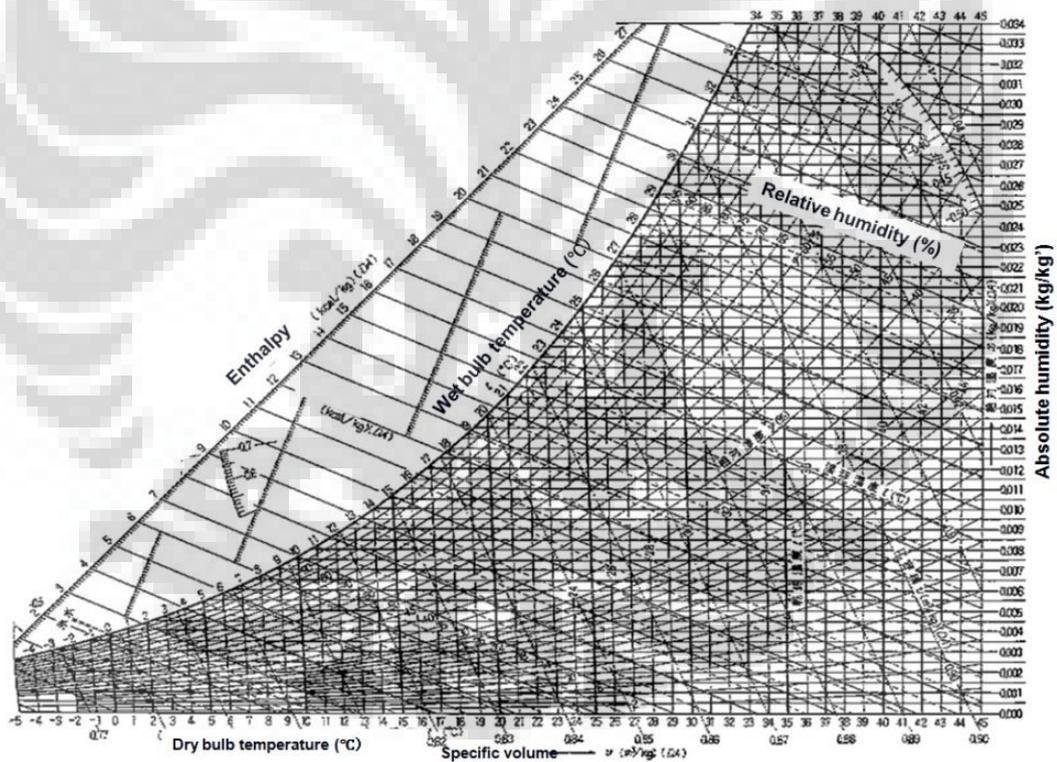
$$a_w = \frac{RH_s}{100} = \frac{P}{P_s}$$

dengan :

RHs = Kelembaban relatif dalam keadaan kesetimbangan (%)  
Ps = Tekanan uap jenuh (atm) .

Kelembaban Mutlak (Y) adalah besaran yang digunakan untuk menentukan jumlah uap air di udara. Untuk menentukan kelembaban nisbi dan kelembaban mutlak dapat digunakan kurva psikrometrik, dengan mengukur suhu udara basah dan suhu udara kering. Pengukuran udara kering dilakukan dengan meletakkan termometer di udara, dan suhu udara basah diukur dengan menggunakan thermohygro-meter yang ujungnya dibungkus dengan kapas basah.

## 2.5 Diagram Psikrometrik



Gambar 2.5. Diagram Psikrometrik

Gambar 2.5 adalah diagram psikometri dimana psikometri adalah merupakan kajian tentang sifat-sifat campuran udara dan uap air yang mempunyai

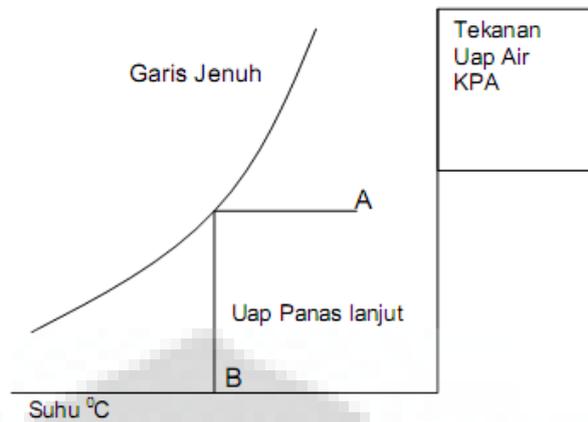
arti yang sangat penting dalam pengkondisian udara atau penyegaran udara karena atmosfer merupakan campuran antara udara dan uap air. Prinsip-prinsip psikrometrik akan diterapkan pada perhitungan beban, sistem- sistem pengkondisian udara, koil pendingin udara, pengurangan kelembaban, menara pendingin dan kondensor penguapan.

Dalam hal ini dalam hal ini ada dua hal yang penting diperhatikan yaitu penguasaan atas dasar-dasar bagan dan kemampuan menentukan sifat-sifat pada kelompok keadaan yang lain misalnya tekanan barometrik yang tidak standar. Diagram yang dikembangkan dari persamaan-persamaan cukup teliti dan dapat digunakan dalam perhitungan-perhitungan keteknikan.

Sifat termal dari udara basah pada umumnya ditunjukkan dengan menggunakan diagram psikrometri seperti terlihat pada diagra dan memakai beberapa istilah dan simbol seperti:

➤ **Garis jenuh (saturation line)**

Garis jenuh ini adalah salah satu istilah pada diagram psikometri koordinat-koordinat dimana suhu ( $t$ ) sebagai basis dan tekanan uap air ( $p_s$ ) sebagai ordiat. Untuk jelasnya dapat dilihat pada diagram psikrometri. Garis jenuh dapat ditarik pada diagram tersebut seperti gambar dibawah. Data untuk garis jenuh dapat dilihat langsung pada tabel tentang air jenuh. Daerah sebelah kanan garis jenuh adalah daerah uap air panas lanjut. Jika uap ini didinginkan dengan tekanan tetap maka akan dicapai garis nuh yaitu batas uap air mulai mengembun gambar dibawah dapat dianggap berlaku untuk campuran udara uap air. Pada gambar menunjukkan apabila titik A merupakan keadaan suatu campuran udara agar terjadi pengembunan, maka suhu campuran tersebut harus diturunkan hingga B udara pada titik A dikatakan mempunyai suhu titik embun B.



Gambar 2.6. Garis Jenuh

➤ **Temperatur Bola Kering (Dry Bulb)**

Temperatur tersebut dapat dibaca pada termometer dengan sensor kering dan terbuka. Tetapi perlu diperhatikan bahwa penunjukannya tidak selalu tepat karena ada pengaruh radiasi panas kecuali jika sensornya memperoleh ventilasi yang cukup baik.

➤ **Temperatur Bola Basah (Wet Bulb)**

Temperatur ini disebut juga temperatur jenuh adiabatik diperoleh dengan menggunakan termometer dengan sensor yang dibalut dengan kain basah untuk menghilangkan pengaruh radiasi panas, tetapi perlu diperhatikan bahwa sensor harus dialiri udara sekurang-kurangnya 5 m/s.

Alat pengukur kelembaban nisbi secara langsung yang dapat digunakan dengan ketelitian yang cukup tinggi, antara lain adalah Sling Psikrometer dan Higrometer. Sling Psikrometer terdiri dari dua termometer dan satu diantaranya dengan tandon terbungkus kain atau kapas basah. Setelah wick dibasahi, maka alat tersebut diputar dan udara sekeliling akan menguapkan air yang ada pada wick tersebut.

Suhu bagian yang ada kapasnya akan turun karena untuk penguapan tersebut diperlukan kalor. Suhu bola basah akan terus turun sampai akhirnya tidak dapat turun lagi. Pada keadaan tersebut uap air yang menguap sama dengan uap air yang mengembun di kapas atau dengan kata lain suhu kapas terendah pada keadaan jenuh. Kemudian suhu yang ditunjukkan masing-masing termometer

dicatat, dan kelembabannya dapat ditentukan dengan menggunakan diagram psikrometri.

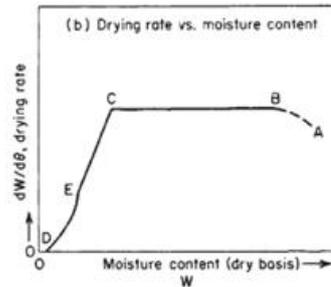
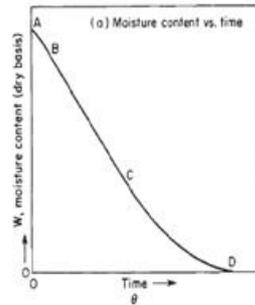
Perbedaan suhu bola kering dan bola basah menunjukkan kelembaban udara itu. Makin besar perbedaan suhu yang ada, maka makin rendah kelembaban nisbi yang ada di udara sekeliling pada saat itu. Suhu bola kering pada diagram psikrometrik ditunjukkan oleh garis tegak lurus, sedangkan suhu bola basah oleh garis-garis miring. Kelembaban nisbi ditunjukkan oleh garis lengkung, sedang garis-garis horizontal menunjukkan kandungan air di udara.

## **2.6 Proses Pengeringan**

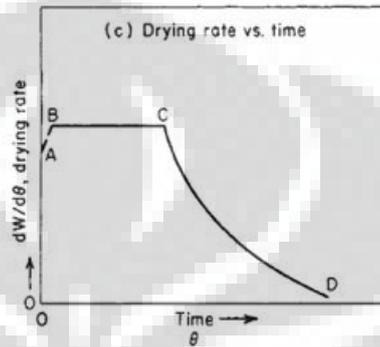
Proses pengeringan dapat dibagi menjadi dua periode yaitu periode dengan laju pengeringan konstan dan periode dengan laju pengeringan menurun (Henderson dan Perry, 1976).

Laju pengeringan konstan terjadi sampai air bebas dipermukaan bahan telah hilang dan laju pengeluaran air semakin berkurang. Laju pengeringan konstan tergantung pada luas permukaan bahan, perbedaan kelembaban antara aliran udara dengan permukaan basah, koefisien pindah panas dan kecepatan udara pengering. Kadar air pada saat laju pengeringan berubah dari konstan ke laju pengeringan menurun dan disebut kadar air kritis. Menurut Henderson dan Perry (1976), laju pengeringan konstan terjadi pada awal proses pengeringan produk biologi dengan kadar air lebih besar dari 70% basis basah dan merupakan fungsi dari suhu, kelembaban dan kecepatan udara pengering dan laju perpindahan dalam bahan ke permukaan sama besar dengan laju penguapannya dari permukaan bahan ke udara sekitar.

Laju pengeringan menurun meliputi dua proses, yaitu perpindahan air dari dalam bahan ke permukaan bahan dan perpindahan uap air dari permukaan bahan ke udara sekitarnya. Semakin besar luas permukaan yang dikeringkan dan semakin besar selisih tekanan uap air permukaan dan udara maka laju pengeringan akan semakin cepat.



(a). Grafik kadar air dan waktu pengeringan (b). Grafik laju pengeringan dan kadar air



(c). Grafik laju pengeringan dan waktu

Gambar 2.7. Grafik Periode dari Pengeringan

Gambar (a) adalah grafik hubungan kadar air terhadap waktu pengeringan. Gambar (b) adalah grafik hubungan laju pengeringan terhadap kadar air sedangkan gambar (c) adalah grafik hubungan laju pengeringan terhadap waktu. Dari ke-3 gambar, bagian AB menggambarkan periode pemanasan bahan, bagian BC menggambarkan periode laju pengeringan konstan. Titik C merupakan titik kadar air kritis dimana periode laju pengeringan konstan berakhir dan laju pengeringan menurun dimulai. Bagian CD pada gambar (a) menggambarkan periode laju pengeringan menurun. Bagian CE pada gambar (b) dapat didefinisikan sebagai awal dari periode laju pengeringan menurun dan bagian DE didefinisikan sebagai periode laju pengeringan kedua.

Mekanisme pengeringan dapat diterangkan dengan teori tekanan uap. Air yang diuapkan terdiri dari air bebas dan air terikat. Air bebas berada pada permukaan bahan dan yang pertama mengalami penguapan. Laju penguapan air bebas sebanding dengan perbedaan tekanan uap pada permukaan bahan terhadap tekanan uap udara pengering. Bila konsentrasi air permukaan cukup besar maka akan terjadi laju penguapan yang konstan. Selama proses pengeringan terjadi

penurunan suhu bola kering yang disertai dengan kenaikan kelembaban mutlak udara pengering dan entalpi.

Perhitungan laju pengeringan

$$\dot{m}_{ev} = -\frac{dm}{dt} = \frac{m_0 - m_t}{\Delta t}$$

Dimana:

$\dot{m}_{ev}$  = Laju evaporasi (pengeringan) bahan (g/m)

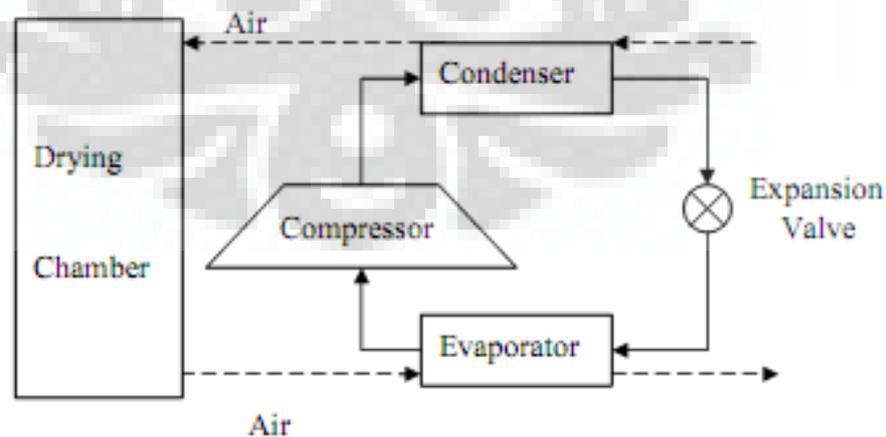
$m_0$  = Massa awal bahan (g)

$m_t$  = Massa akhir bahan (g)

$\Delta t$  = Selang waktu pengeringan (m)

## 2.7 Perbedaan Prinsip Kerja Dari Tiga Metode Pengeringan

Terdapat peningkatan permintaan akan makanan yang sehat, termasuk siap saji dan makanan instan yang mengandung konsentrasi bahan kimia sintetis yang minimum. Hal ini menciptakan tantangan bagi dunia industri makanan dan perusahaan manufaktur pengering untuk mengembangkan teknologi baru dalam memproses bahan yang sulit atau sensitif menjadi produk akhir dengan kualitas tinggi dan sifat yang lebih baik. Tiga metode pengeringan telah digunakan, seperti sebagai pengeringan pompa kalor, pengeringan beku dan pengeringan vakum, untuk menjaga kualitas dan mempertahankan nutrisi.



Gambar 2.8. Skema Heat Pump Drying

Gambar 2.8 menunjukkan diagram skematik yang disederhanakan dari sistem pengeringan pompa kalor. Garis panah utuh menunjukkan siklus refrigeran. Garis panah putus-putus menunjukkan aliran udara.

Pada dasarnya, pompa kalor memiliki empat komponen: evaporator, kondensor, sebuah kompresor dan katup ekspansi. Refrigeran dikompresi dengan tekanan dan temperatur yang relatif tinggi sebelum memasuki kondensor, di mana ia menolak panas untuk medium sekitarnya. Kemudian refrigeran masuk katup ekspansi sehingga memiliki tekanan rendah dan panas diserap oleh evaporator. Istilah heat pump datang saat udara sebagai media pengeringan dipanaskan pada kondensor. Kemudian, udara panas mengalir ke ruang pengering dimana kelembaban meningkat dan temperatur menurun, karena air menguap dari bahan pengeringan. Udara lembab yang mengalir keluar dari ruang pengering mengembun pada evaporator karena terjadi kondensasi. Karena proses pengeringan dan proses kondensasi berlangsung di tempat yang berbeda, temperatur pengeringan dan RH/Relative Humidity dapat dikendalikan dengan bebas pada Heat Pump Drying. Saat ini, temperatur pengeringan maksimum pada heat pump terbatas pada 120°C. Hal ini disebabkan kurang tingginya terbukti temperatur kerja refrigeran dan ketidakterediaan kompresor yang cocok.

Pada metode freeze drying air diambil dari sampel yang dibekukan melalui proses sublimasi. Untuk memfasilitasi proses sublimasi tersebut, suhu pengeringan dikurangi menjadi -10°C dan tekanan di bawah titik triple point, yakni 4,58 mm/Hg. Menurut Pikal (1990), Proses freeze drying dibagi menjadi tiga tahap: pembekuan, pengeringan primer (di mana sublimasi terjadi) dan pengeringan sekunder (di mana air yang tidak membeku diangkat). Waktu pengolahannya biasanya cukup panjang, bisa 3 sampai 5 hari. Bahan biologis tertentu, seperti obat-obatan dan bahan makanan, yang sensitif terhadap panas, mungkin dapat menggunakan metode freeze drying. Terdapat sebuah tren yang berkembang, yakni pada industri bioteknologi dan farmasi untuk persiapan dan penyimpanan dari protein terapi dan enzim labil (Liapis, 1995; Carpenter et al, 1997).

Sebagai aturan, produk dari proses freeze drying memiliki kualitas terbaik di antara semua produk kering lainnya. Pori, struktur yang tidak menyusut

menghasilkan rehidrasi yang cepat, yang baik untuk beberapa produk makanan. Namun, biaya pengeringan makanan dengan freeze drying jauh lebih tinggi dari sistem pengeringan konvensional seperti semprotan pengering (Chou dan Chua, 2001).

Berbeda dengan metode *vacuum drying*, metode ini dilakukan pada tekanan rendah yang memberikan keuntungan karena titik didih air lebih rendah di bawah tekanan yang berkurang. Hal ini memungkinkan produk secara efektif dikeringkan pada suhu yang lebih rendah. Selama proses itu, tekanan internal makanan lebih besar daripada tekanan ambien dalam ruang pengering dan, karenanya hal ini mencegah penyusutan dan mempertahankan bentuk kubik. Namun, tentunya waktu dan biaya energi menjadi lebih besar.

## 2.8 Heat Pump Drying

Sistem pengering konvensional seperti diketahui terdiri dari unit pembangkit energi termal seperti kompor (burner), tungku biomass atau minyak bumi, dan ruang pengering. Energi termal baik secara langsung atau tidak langsung dimasukkan ke dalam ruang pengering dan setelah melalui susunan produk yang dikeringkan energi termal dalam bentuk udara panas atau gas asap menjadi lembab lalu kemudian di buang ke udara lingkungan melalui cerobong atau ventilasi, dan kehilangan energi panas melalui cerobong atau ventilasi tersebut relatif besar. (Siregar, P; 2003).

Sedangkan pada sistem pengering *heat pump* udara panas dihasilkan setelah melalui kondesor masuk ke dalam ruang pengering kemudian menjadi lembab setelah melewati produk yang dikeringkan, kemudian disirkulasi kembali ke unit *dehumidifier* (evaporator) kandungan air dalam udara lembab tersebut di kondensasi menjadi titik air dan dikeluarkan dari ruang pengering dalam bentuk air, sehingga kelembaban udara pengeringan menjadi turun dan selanjutnya disirkulasikan kembali kedalam ruang pengering. Demikian siklus udara pengeringan bekerja berulang-ulang. Daya pengeringan sistem pengeringan ini selain tergantung pada kemampuan pemanasnya, juga pada kemampuan mengkondensasi udara lembab yang terjadi dalam ruang pengering dan kemampuan yang terakhir ini merupakan keunggulan dari teknologi *heat pump*

*drying*. Dan tentu juga pada sistem distribusi udara pengeringan di dalam ruang pengering sendiri harus dalam kondisi sedemikian rupa memenuhi ketentuan teknis, sehingga kemampuan sistem pengering heat pump secara keseluruhan lebih baik dibandingkan dengan sistem konvensional.

## 2.9 Performa Heat Pump Drying

Sejak awal peradaban, konsumsi energi telah meningkat. Setiap indikasi menunjukkan bahwa konsumsi energi akan menunjukkan tren naik akibat dari populasi dunia yang terus meningkat. Pengeringan merupakan proses industri yang membutuhkan jumlah energi yang besar, terutama ketika mengeringkan bahan yang sensitif pada temperatur, karena penggunaan energi termal suhu yang rendah. Sebuah efisiensi exergetics yang sangat rendah menunjukkan, ketika sumber energi termal bermutu tinggi (bahan bakar atau listrik) digunakan untuk mencapai tugas ini. Exergy didefinisikan sebagai jumlah maksimum teoritis dari pekerjaan yang dapat diperoleh dari sistem pada keadaan yang ditentukan (P, T, h, s, u, v) ketika beroperasi dengan reservoir pada tekanan dan temperatur yang konstan.

*Heat pump* merupakan perangkat yang dapat membuat penggunaan energi dari sumber energi yang bermutu tinggi dan memungkinkan panas keluaran yang beberapa kali lebih tinggi dari energi input. Keuntungan ini meningkat karena suhu target untuk pemanasan mendekati suhu ambien. Oleh karena itu, adalah wajar untuk mempertimbangkan heat pump sebagai alat pengering yang baik.

Koefisiensi performa (COP) merupakan parameter yang umum untuk menentukan efisiensi dari *heat pump*. Berikut rumus COP tersebut.

$$COP = \frac{\text{Useful heat output}}{\text{Power input}}$$

Efisiensi maksimum teoritis dari heat pump ialah efisiensi ketika ia berada dalam siklus Carnot :

$$COP' = \frac{T_{condenser}}{T_{condenser} - T_{evaporator}}$$

Untuk heat pump COP dapat menjadi parameter performa yang baik. Ketika menganalisa proses pengeringan, pendekatan parameter efisiensi yang lebih baik ialah dengan menggunakan specific moisture extraction rate (SMER), yang berarti massa air yang terevaporasi per unit dari energi input-nya:

$$SMER = \frac{\text{Amount of water evaporated}}{\text{Energy input}}, \text{ (kg / kWh)}$$

Nilai SMER ini divariasikan atas temperatur udara maksimum dalam alat pengering, RH/Relative humidity, temperatur evaporasi dan kondensasi serta efisiensi dari sistem refrigerasi. Sebuah nilai SMER yang dicapai oleh heat pump ialah 2.5 kg/kWh yang berada pada kisaran 1 sampai 4 kg/kWh, jauh lebih besar dari pengeringan konvensional dengan kisaran 0.5 sampai 1 kg/kWh (Perera and Rahman,1997). Akan tetapi, harus diingat bahwa energi kompresor yang dikonsumsi ialah listrik yang merupakan energi dengan nilai yang lebih besar dari pada kalor. Oleh karena itu, saat membandingkan nilai ekonomisnya, biaya energi termal dan listriknya perlu dipertimbangkan.

## **BAB 3**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 TUJUAN PENGUJIAN**

Pengujian ini memiliki tujuan yakni mengetahui seberapa baik unjuk kerja dari alat Heat Pump Drying dengan melakukan pengukuran beberapa parameter, antara lain temperatur, RH, dan massa bahan yang diuji. Pengujian ini dilakukan tanpa dan dengan bahan uji berupa temulawak.

#### **3.2 Komponen Pengujian**

Adapun komponen-komponen pendukung dalam pengujian ini antara lain : kabin berukuran 197 cm x 78.5 cm x 107.5 cm , temulawak 0,9 kg, AC Split bermerek Chang Hong tipe-standar CSC 05Y3(1/2 PK), peralatan listrik seperti *power supply*, timbangan digital, serta Thermohygrometer Digital.

##### **3.2.1 Model Kabin**

Dalam pengujian ini kabin panjang x lebar x tinggi = 197cm x 78.5cm x 107.5cm dengan material dinding berupa papan dengan ketebalan 15 mm. Dimana rangkanya berupa besi persegi hollow berukuran 30cm x 30cm. Adapun rak yang digunakan untuk menaruh bahan uji berupa kawat kassa yang tersusun dua tingkat yang masing-masing akan diletakkan dengan bahan uji berupa temulawak 0,5 kg.



Gambar 3.1 Kabin Heat Pump Drying

### 3.2.2 Thermohygrometer Digital



Gambar 3.2 Thermohygrometer digital

Model	: HT 100
Temperature	: -50 – 70 <sup>0</sup> C (-58 – 158 <sup>0</sup> F)
Resolution	: 0,1 <sup>0</sup>
Humidity	: 20 – 99% RH
Resolution	: 1% RH

Thermohygrometer Digital digunakan sebanyak empat buah untuk mengukur temperatur dan RH/Relative Humidity di empat titik dalam kabin, yakni sebelum kondenser, sesudah kondenser, sebelum bahan uji, dan sesudah bahan uji.

### 3.2.3 AC Split Chang-Hong tipe-standar CSC 05Y3( $\frac{1}{2}$ PK)

Kondenser AC Split Changhong ukuran  $\frac{1}{2}$  PK digunakan dalam penelitian ini sebagai penghasil panas untuk mengeringkan bahan uji dan evaporator digunakan untuk mengkondensasikan uap air dari bahan uji.



Gambar 3.3 AC Split Changhong  $\frac{1}{2}$  PK

### 3.2.4 Timbangan Digital

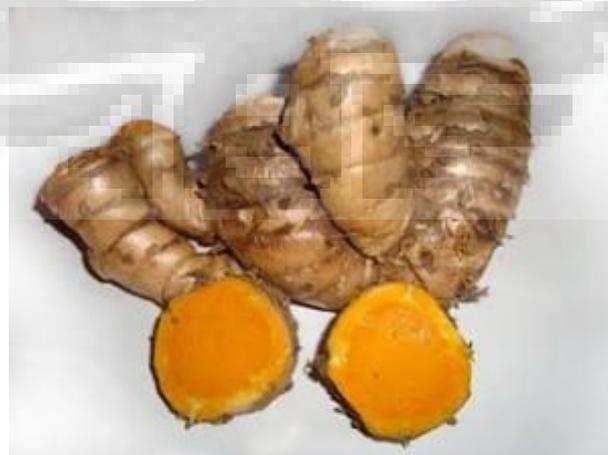
Timbangan digital ini digunakan untuk menimbang massa bahan sebelum dan sesudah pengeringan. Selain itu digunakan pula untuk menimbang massa air kondensat. Timbangan ini digunakan untuk mengukur perubahan berat dari bahan setelah bahan tersebut dikeringkan pada Heat Pump Drying selama waktu pengujian. Timbangan ini mempunyai keakuratan mencapai 0,01 gram sehingga

mempunyai tingkat kepresisian cukup tinggi dan berat maksimum yang dapat diukur ialah 300 gram. Timbangan ini pun dapat mengkalibrasi dirinya sendiri sehingga dapat menggunakan pengguna saat melakukan pengukuran.



Gambar 3.4 Timbangan digital

### 3.2.5 Temulawak



Gambar 3.5 Temulawak

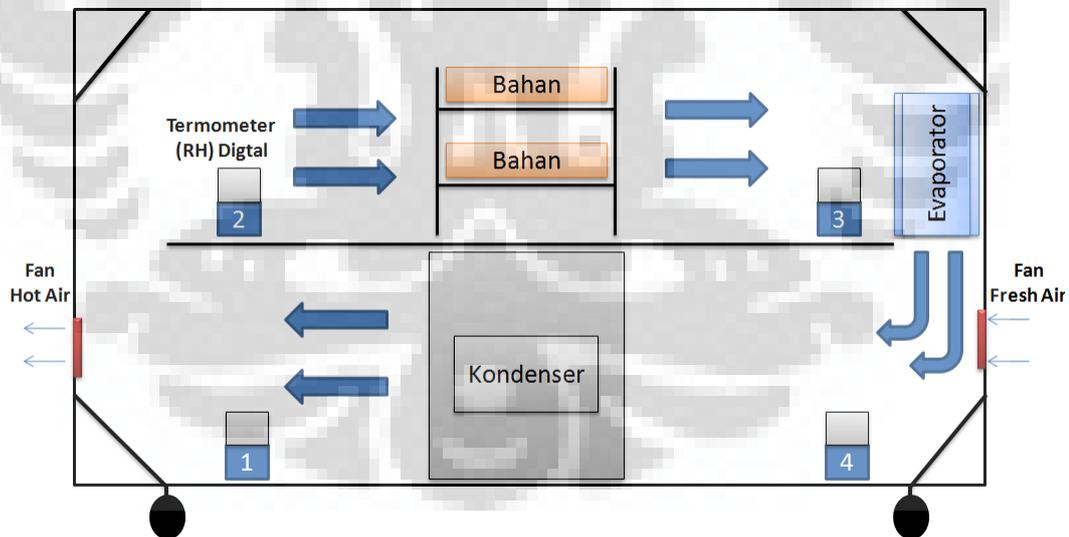
Dalam penelitian ini bahan uji yang digunakan ialah temulawak dengan massa 1 kg yang kemudian dibagi menjadi dua bagian sama besar dan diletakkan pada rak atas dan bawah. Temulawak ini diiris setebal 5-7 mm.

### 3.3 Variasi Pengambilan Data

Pengujian dan pengambilan data dilakukan dilaboratorium Perpindahan Panas Departemen Teknik Mesin FTUI. Pengambilan data tersebut meliputi :

- Pengambilan data temperatur dan RH/Relative Humidity di empat titik pada kompartemen tanpa dan dengan bahan uji.
- Pengambilan data massa bahan uji dan massa air kondensat sebelum dan sesudah pengeringan.
- Adapun variasi yang digunakan ialah ada dan tidaknya penggunaan beban yakni bahan uji itu sendiri.

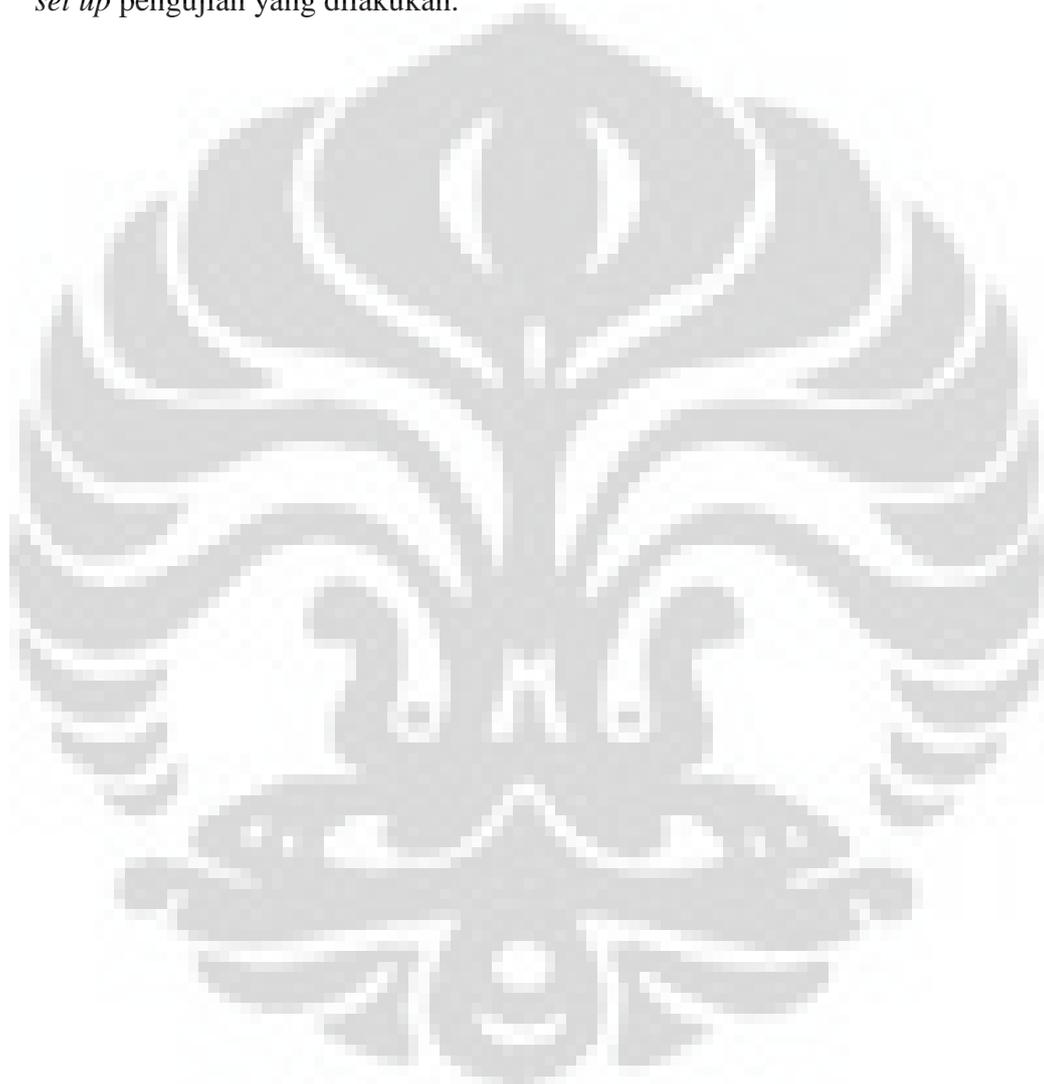
### 3.4 Prosedur Pengambilan Data



Gambar 3.6 Skema Pengujian *Heat Pump Drying*, HPD.

Prosedur pengujian adalah mulai dari menyiapkan peralatan pengujian, menimbang massa awal bahan, memasukan bahan ke tiap rak, mencatat temperatur awal kabin, menghidupkan sistem heat pump drying sesuai manual

operasinya, stopwatch diaktifkan bersamaan dengan pengoperasian sistem, mencatat massa jamur setiap selang waktu 15 menit selama 480 menit (8 jam). Nyalakan fan fresh air dan hot air jika ketika running  $RH \leq 25\%$ . Kemudian melakukan pengulangan 2 kali dalam kondisi yang sama. Kemudian untuk prosedur pengujian tanpa beban sama dengan yang menggunakan beban kecuali tidak ada bahan temulawak yang dikeringkan. Gambar 3.6 berikut menunjukkan *set up* pengujian yang dilakukan.

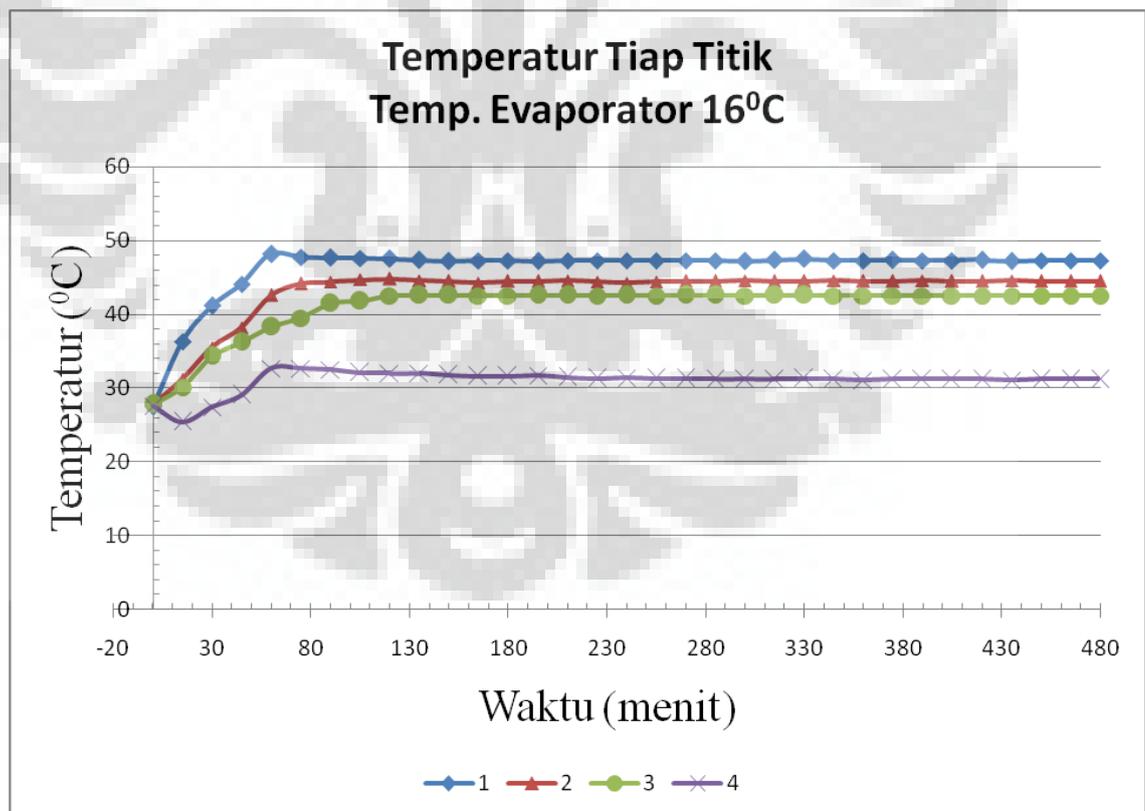


## BAB 4

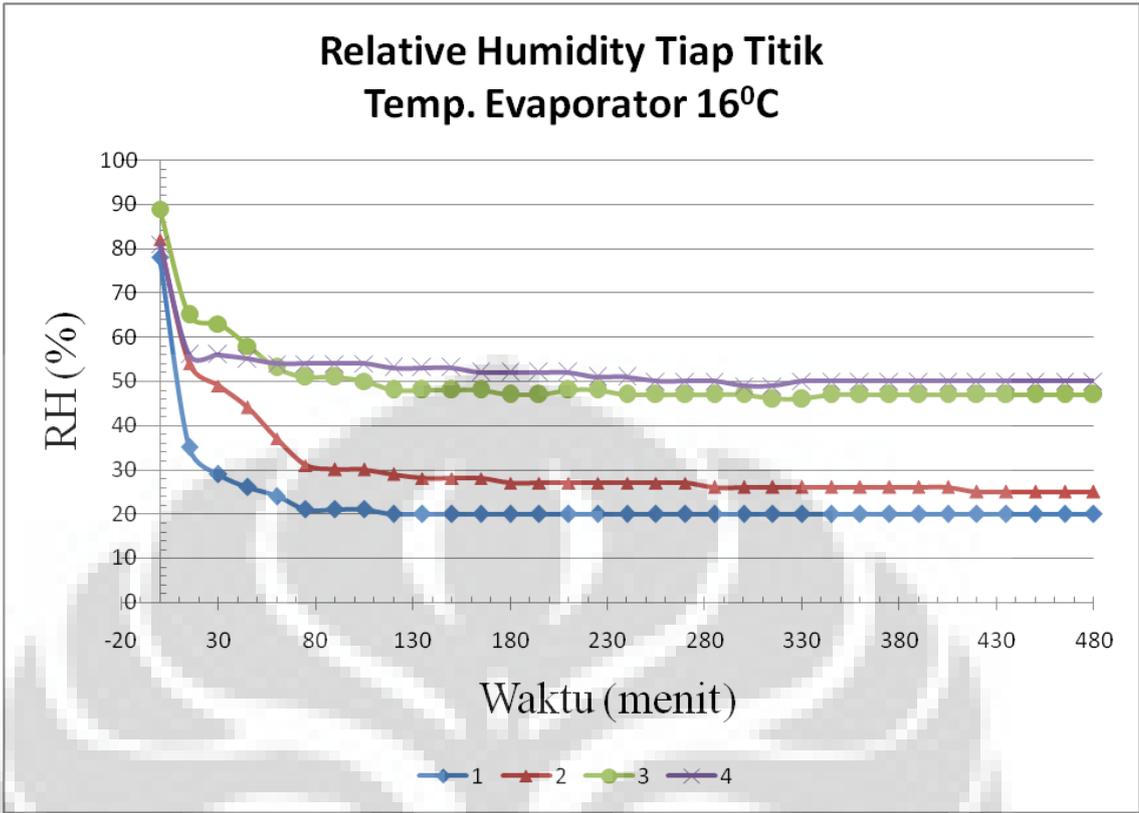
### PEMBAHASAN

Hasil pengujian dilakukan pada saat kerja maksimum dari kondenser dengan mengatur temperatur kerja evaporator terendah. Semakin rendah temperatur kerja evaporator maka akan semakin tinggi temperatur kerja dari kondenser. Hal ini dilakukan karena ingin melihat kerja maksimum dari alat *heat pump drying*, HPD.

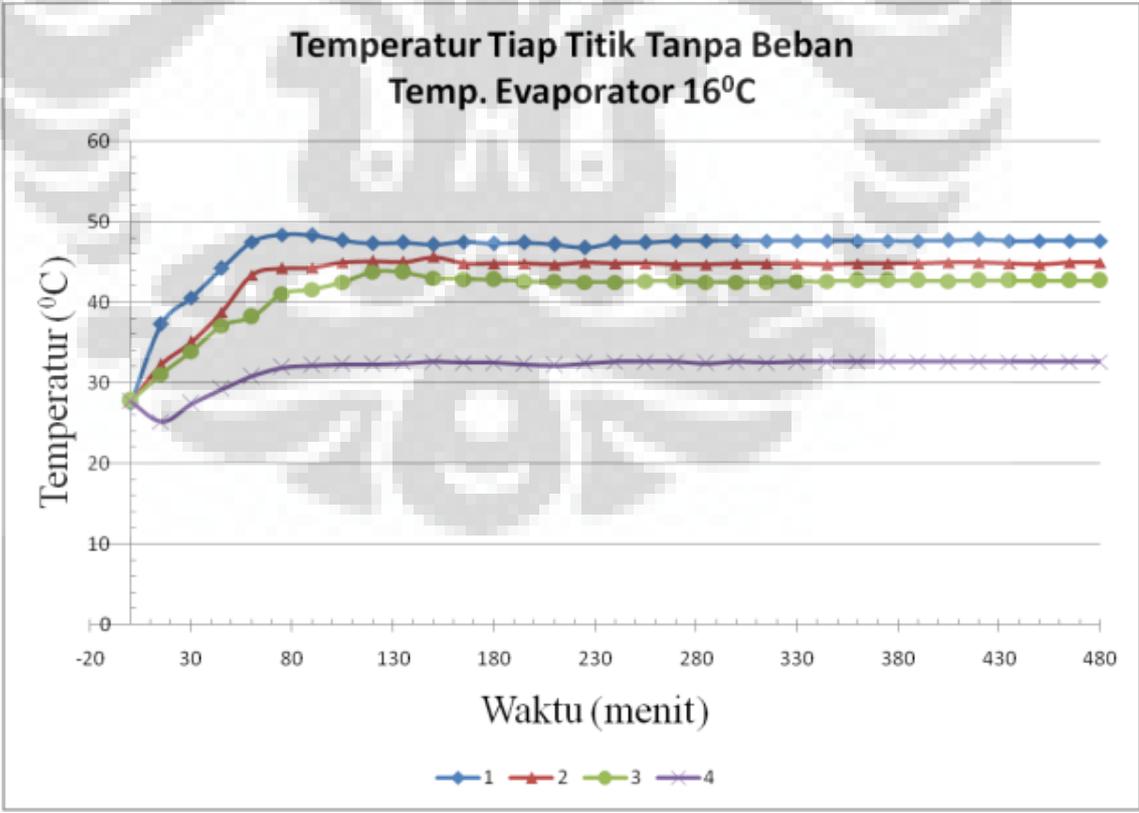
Hasil pengujian untuk temperatur dan RH dengan beban atau tanpa beban tidak terlalu berbeda. Temperatur dan RH tertinggi rata-rata pada saat kondisi steady terdapat pada titik keluaran kondenser sebesar 48°C dengan RH 20% setelah kurang lebih 2 jam running.



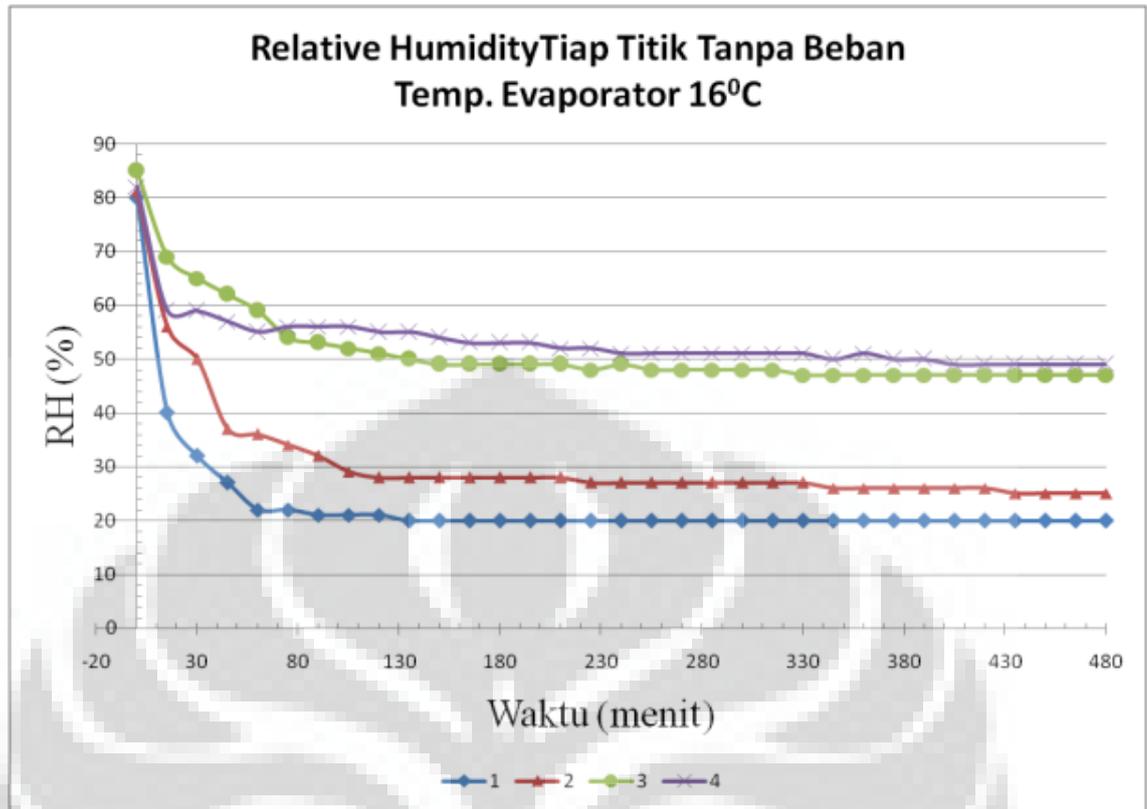
Gambar 4.1 Grafik Temperatur Dengan Beban



Gambar 4.2. Grafik RH Dengan Beban



Gambar 4.3 Grafik Temperatur Tanpa Beban

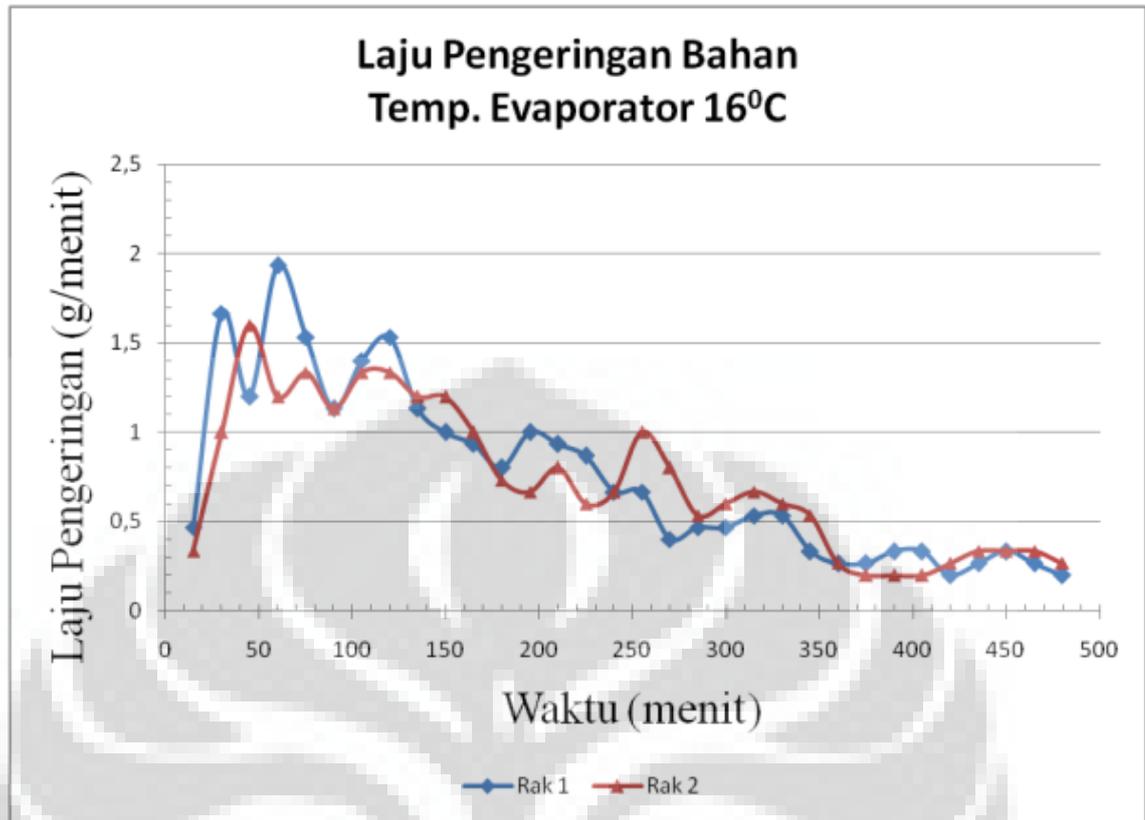


Gambar 4.4. Grafik RH Tanpa Beban

Pada hasil pengeringan bahan temulawak dengan *heat pump drying* warna dan aroma lebih baik dari bahan temulawak yang dikeringkan dengan sistem oven yang ada dipasaran.

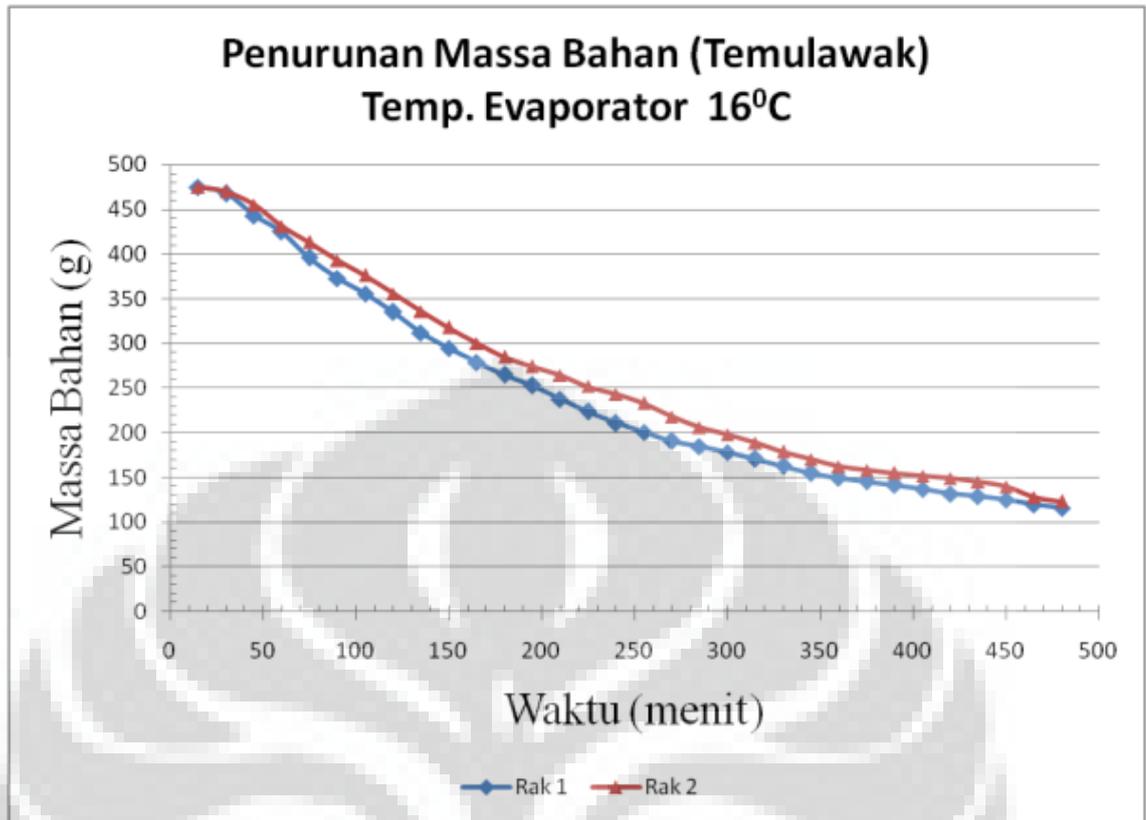


Gambar 4.5. Temulawak hasil pengeringan dengan HPD (kiri) dan pengeringan dengan oven (kanan)



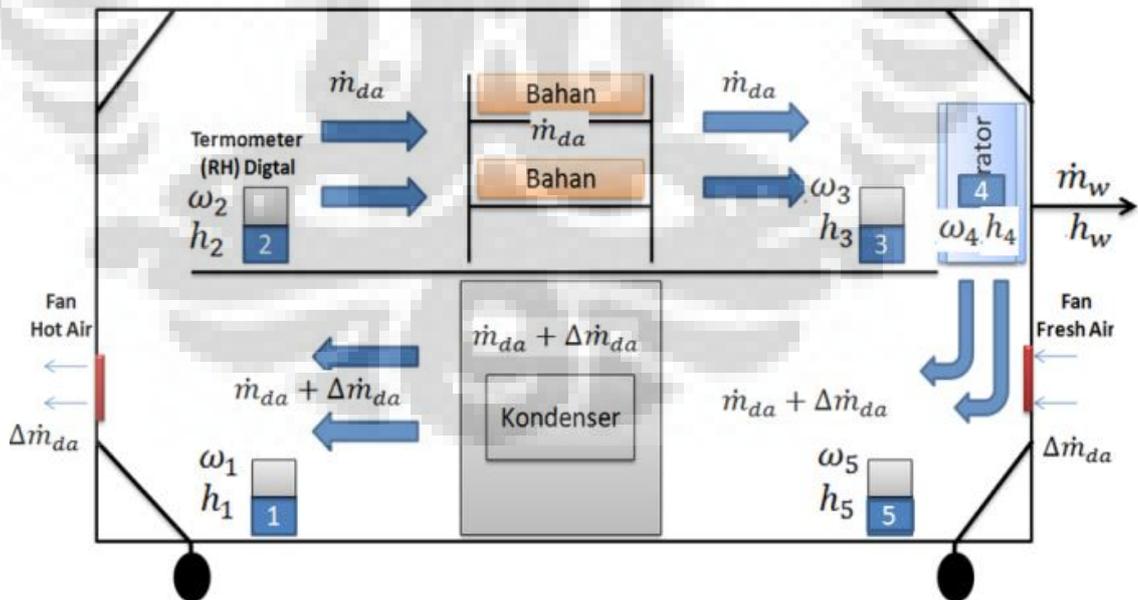
Gambar 4.6. Grafik Laju Pengeringan Bahan

Gambar 4.6. terlihat jelas perbedaan laju pengeringan pada kondisi rak 1 dan rak 2. Hal ini disebabkan flow udara panas yang berasal dari kondenser tidak sama, cenderung lebih besar ketika melewati rak 1 dibandingkan dengan rak 2. Penyebab perbedaan flow udara panas dari kondenser akibat konstruksi dari saluran udara pada kabin.



Gambar 4.7. Grafik Penurunan Massa Bahan

#### 4.1 Analisis Perhitungan



Gambar 4.8. Skema Analisis Perhitungan Heat Pump Drying, HPD

Pada analisis perhitungan unit evaporator menjadi titik 4 sehingga setelah evaporator menjadi titik 5. Analisis perhitungan dengan menggunakan beberapa asumsi, yaitu:

1. Dinding tidak mengalami evaporasi
2. Dinding tidak mengalami proses heat transfer
3. Kabin terisolasi tidak ada kebocoran udara

#### 4.1.1 Mass Balance

Proses 1-2

$$(\dot{m}_{da} + \Delta\dot{m}_{da})\omega_1 = \dot{m}_{da}\omega_2$$

Proses 2-3

$$\dot{m}_{da}\omega_2 + \dot{m}_{ev} = \dot{m}_{da}\omega_3$$

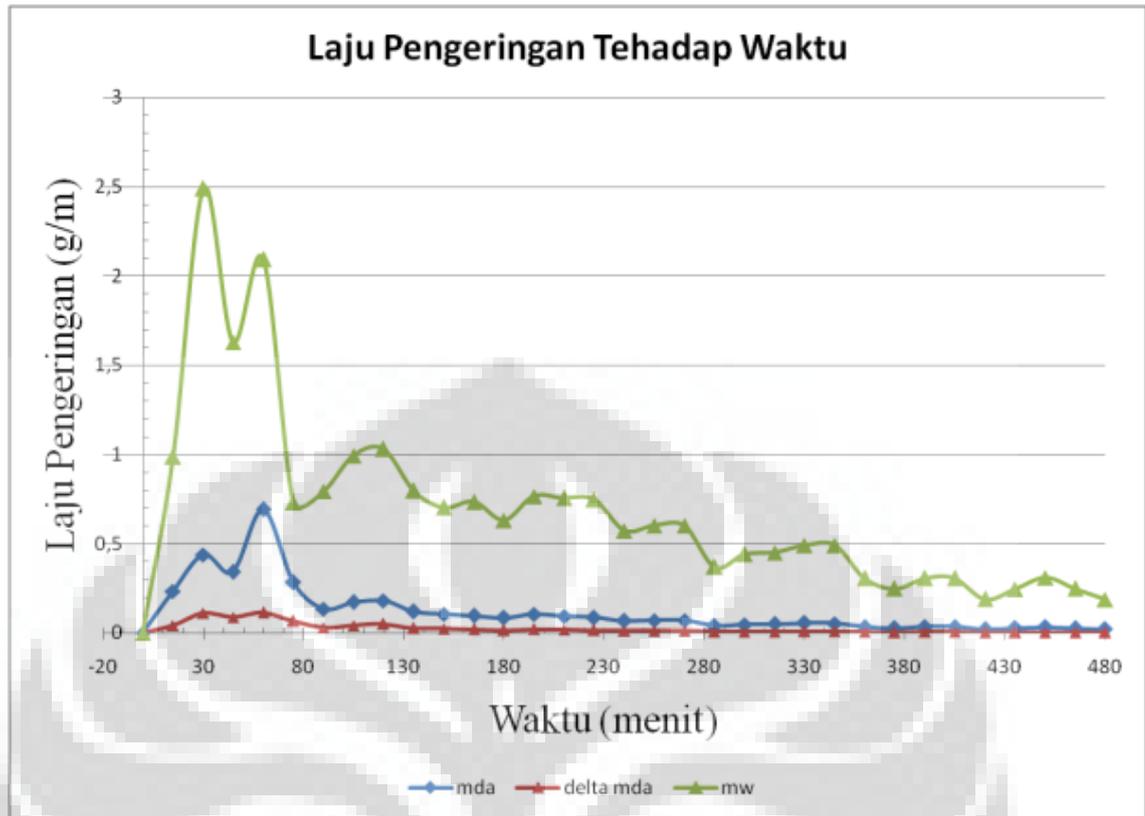
Proses 3-4

$$\dot{m}_{da}\omega_3 = \dot{m}_{da}\omega_4 - \dot{m}_w$$

Proses 4-5

$$\dot{m}_{da}\omega_4 = (\dot{m}_{da} + \Delta\dot{m}_{da})\omega_5$$

Dari hasil perhitungan mass balance didapat nilai rata-rata untuk  $\dot{m}_{da} = 0,12 \text{ g/m}$ ,  $\Delta\dot{m}_{da} = 0,02 \text{ g/m}$ ,  $\omega_4 = 16,71$  dan  $\dot{m}_w = 0,67 \text{ g/m}$



Gambar 4.9 Grafik Laju Pengeringan Terhadap Waktu

#### 4.1.2 Energy Balance

Proses 1-2

$$(\dot{m}_{da} + \Delta\dot{m}_{da})h_1 = \Delta\dot{m}_{da}h_1 + \dot{m}_{da}h_2 + Q_{losses\ 12}$$

Proses 2-3

$$\dot{m}_{da}h_2 - \dot{m}_{da}h_3 - \dot{m}_{ev}h_w = (mc_p)_R \frac{dT_R}{dt} + Q_{losses\ 23}$$

Proses 3-4

$$\dot{m}_{da}h_3 - \dot{m}_{da}h_4 - Q_{evap} - \dot{m}_w h_w = Q_{losses\ 34}$$

Proses 4-5

$$\dot{m}_{da}h_4 + \Delta\dot{m}_{da}h_\infty - (\dot{m}_{da} + \Delta\dot{m}_{da})h_5 = Q_{losses\ 45}$$

Proses 5-1

$$(\dot{m}_{da} + \Delta\dot{m}_{da})h_5 - (\dot{m}_{da} + \Delta\dot{m}_{da})h_1 + Q_{cond} = Q_{losses\ 51}$$

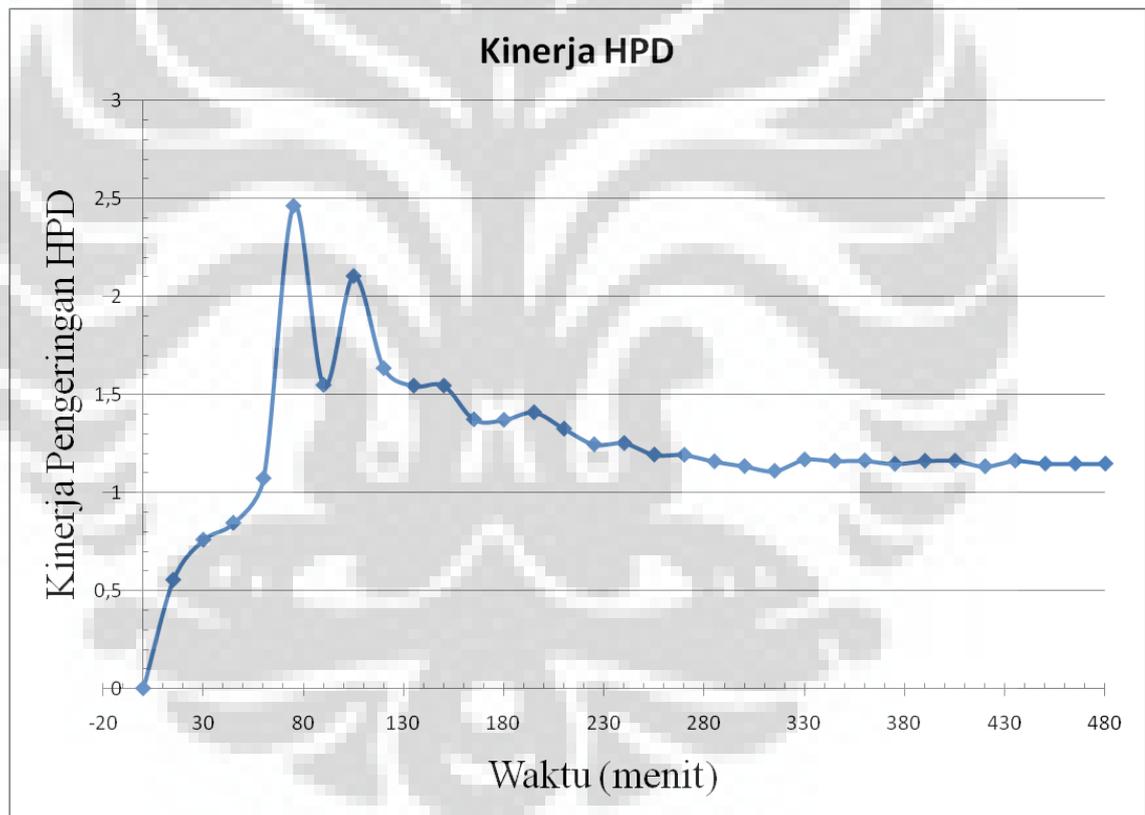
Dalam perhitungan energy balance  $Q_{losses}$  tiap proses diabaikan karena nilainya sangat kecil jika dibandingkan dengan  $Q_{cond}$  dan  $Q_{evap}$ . Sehingga

didapat nilai rata-rata untuk untuk  $Q_{cond} = 60,1 \text{ J/m} = 3605 \text{ Watt}$ ,  $Q_{evap} = 2,4 \text{ J/m} = 144 \text{ Watt}$  dan  $h_4 = 63,31 \text{ kJ/kg}$ .

Sedangkan untuk mencari kinerja pengeringan dari alat HPD dapat menggunakan persamaan dibawah ini:

$$\text{Kinerja pengeringan HPD} = \frac{\dot{m}_{ev} h_w}{P_{comp}} = \frac{\dot{m}_{ev} h_w}{Q_{cond} - Q_{evap}}$$

Dari data yang didapat maka kita dapat memperoleh nilai rata-rata dari kinerja pengeringan, yaitu sebesar 1,2



Gambar 4.10. Grafik Kinerja Pengeringan HPD

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat diambil beberapa kesimpulan antara lain;

1. Perbedaan temperatur dan RH pada alat *heat pump drying* tidak terlalu signifikan antara pengujian tanpa beban maupun dengan beban.
2. Perbedaan temperatur pada tiap titik disebabkan oleh *heat lose* yang terjadi selama proses pengeringan berlangsung. Hal ini disebabkan oleh udara panas dari kondenser pertama kali digunakan untuk memanaskan ruangan kabin.
3. Temperatur tetinggi udara panas saat steady dari keluaran kondenser dapat mencapai  $48^{\circ}\text{C}$  dengan RH 20%. Dengan patokan ini maka alat pengering *heat pump drying* dapat digunakan untuk pengeringan.
4. Laju massa udara kering rata-rata pada ruang pengering  $\dot{m}_{da} = 0,12 \text{ g}/\text{m}$ , laju massa udara rata-rata pada tiap fan  $\Delta\dot{m}_{da} = 0,02 \text{ g}/\text{m}$  dan laju penguapan rata-rata pada bahan  $\dot{m}_w = 0,67 \text{ g}/\text{m}$ .
5. Kinerja sistem HPD sebesar 1,2

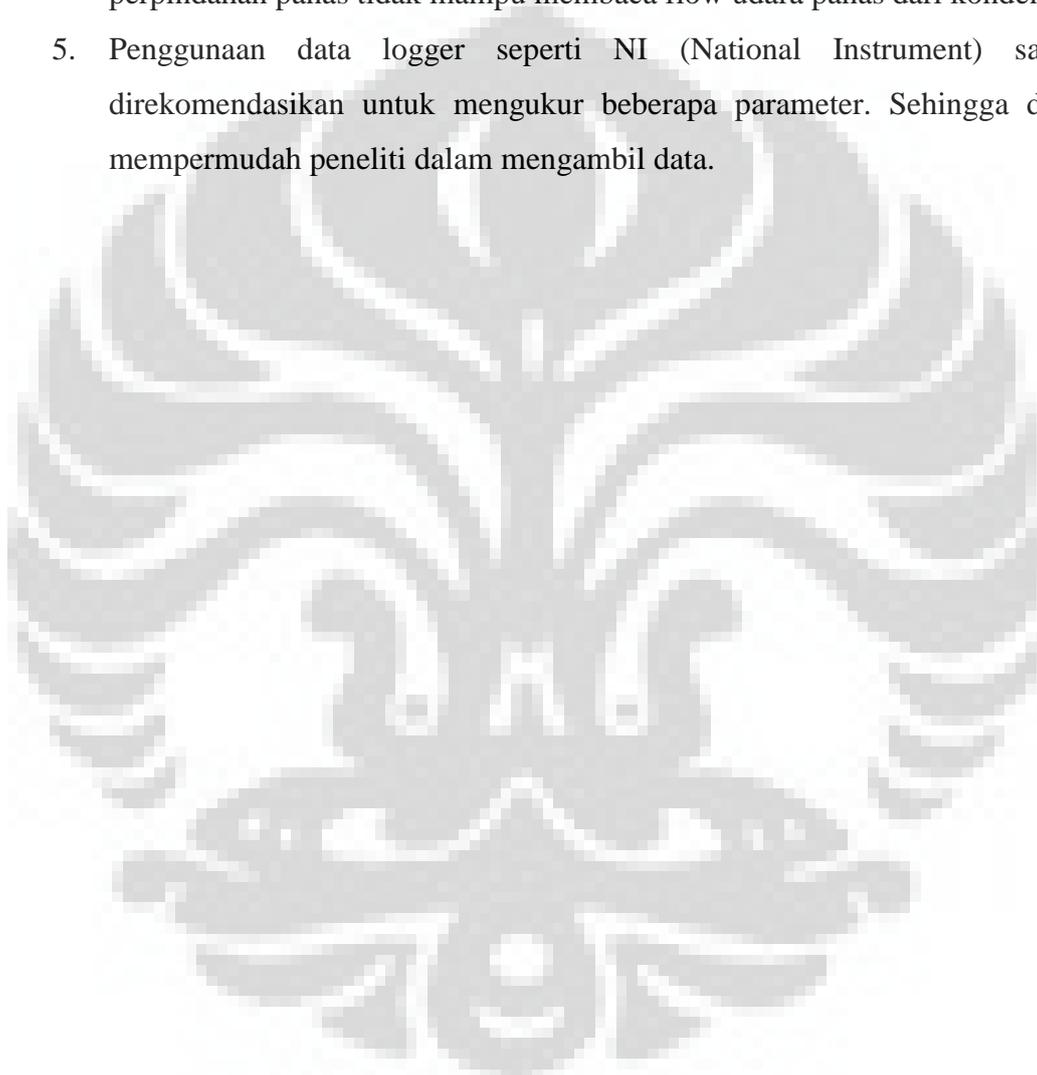
#### 5.2 SARAN

Ada beberapa saran untuk penelitian lebih lanjut :

1. Diperlukannya kontrol untuk mengatur flow udara panas dari keluaran kondenser dengan mengatur kecepatan putar dari motor fan yang terdapat pada kondenser. Karena variasi flow udara panas diperlukan untuk melihat efek dari pengeringan.
2. Perbaiki konstruksi pada saluran udara pada ruang kabin agar flow udara panas dari kondenser dapat merata ketika melewati rak bahan.
3. Keterbatasan alat ukur untuk mengukur RH dengan range 20 – 99 % ternyata masih blom cukup karena RH dari keluaran kondenser dapat lebih

kecil dari 20% terbukti dengan error pada alat ukur karena range RH alat ukur tidak bisa membaca dibawah itu. Penggunaan fan fresh air dan hot air lebih kepada untuk menjaga temperatur dan RH menjadi stabil dan nilainya dapat terbaca pada alat ukur termometer digital.

4. Perlu adanya alat ukur flow udara dengan range ukurnya dibawah 0,2 m/s. Karena alat ukur flow udara hot wire (range 0,2 – 50 m/s) pada laboratorium perpindahan panas tidak mampu membaca flow udara panas dari kondenser.
5. Penggunaan data logger seperti NI (National Instrument) sangat direkomendasikan untuk mengukur beberapa parameter. Sehingga dapat mempermudah peneliti dalam mengambil data.



## DAFTAR REFERENSI

- Birchal V. S., dan Passos M. L. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. Vol. 22, No. 02, pp. 293 - 302, April - June, 2005.
- Frank P. Incopera , David P. Dewitt, 1996, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Fourth Edition, John Wiley & Sons, New York
- Iva Filkova´, Li Xin Huang, and Arun S. Mujumdar. Chapter 10: Industrial Spray Drying Systems.
- Mujumdar Arun S. dan Sakamon Devahastin .Chapter 1: *Fundamental principle of drying*.
- Mujumdar, Arun S. 2006. *Handbook of Industrial drying*. Taylor & Francis group, New York.
- Stromment I, Eikevik T.M., Filho O.A., “*Optimum Design and Enhanced Performance of Heat Pump Dryers*”, *1<sup>st</sup> Asian-Australian Drying Conference*, hal 68-80, October 24-27, 1999 Bali, Indonesia, Organized by: Crea – Research Institute – IPB Bogor.
- Supriono. (2003). Mengukur faktor faktor dalam proses pengeringan.
- Treybal, R.E., *Mass Transfer Operations*, McGraw-Hill, 1981, Chapter: Humidification and Drying.
- The World’s Leading Information centre on Heat Pumps in Industry, <http://www.heatpumpcentre.org/tutorial/industry.htm>

## LAMPIRAN

### Percobaan

### Hasil Data Dengan Adanya Beban

aktu (men)	Rak 1				Rak 2			
	Berat Awal	Berat Akhir	Pengurangan	Laju Peng	Berat Awal	Berat Akhir	Pengurangan	Laju Peng
15	475	468	7	0,466667	475	470	5	0,333333
30	468	443	25	1,666667	470	455	15	1
45	443	425	18	1,2	455	431	24	1,6
60	425	396	29	1,933333	431	413	18	1,2
75	396	373	23	1,533333	413	393	20	1,333333
90	373	356	17	1,133333	393	376	17	1,133333
105	356	335	21	1,4	376	356	20	1,333333
120	335	312	23	1,533333	356	336	20	1,333333
135	312	295	17	1,133333	336	318	18	1,2
150	295	280	15	1	318	300	18	1,2
165	279	265	14	0,933333	300	285	15	1
180	265	253	12	0,8	285	274	11	0,733333
195	253	238	15	1	274	264	10	0,666667
210	238	224	14	0,933333	264	252	12	0,8
225	224	211	13	0,866667	252	243	9	0,6
240	211	201	10	0,666667	243	233	10	0,666667
255	201	191	10	0,666667	233	218	15	1
270	191	185	6	0,4	218	206	12	0,8
285	185	178	7	0,466667	206	198	8	0,533333
300	178	171	7	0,466667	198	189	9	0,6
315	171	163	8	0,533333	189	179	10	0,666667
330	163	155	8	0,533333	179	170	9	0,6
345	155	150	5	0,333333	170	162	8	0,533333
360	150	146	4	0,266667	162	158	4	0,266667
375	146	142	4	0,266667	158	155	3	0,2
390	142	137	5	0,333333	155	152	3	0,2
405	137	132	5	0,333333	152	149	3	0,2
420	132	129	3	0,2	149	145	4	0,266667
435	129	125	4	0,266667	145	140	5	0,333333
450	125	120	5	0,333333	140	135	5	0,333333
465	120	116	4	0,266667	128	123	5	0,333333
480	116	113	3	0,2	123	119	4	0,266667

Time	T1	T2	T3	T4	RH1	RH2	RH3	RH4
0	27,5	27,8	27,8	27,6	78	82	89	81
15	36,3	31,2	30,1	25,4	35	54	65	56
30	41,2	35,5	34,3	27,4	29	49	63	56
45	44,1	38,2	36,2	29,1	26	44	58	55
60	48,2	42,6	38,3	32,7	24	37	53	54
75	47,8	44,2	39,5	32,7	21	31	51	54
90	47,7	44,4	41,5	32,5	21	30	51	54
105	47,6	44,7	41,8	32,1	21	30	50	54
120	47,5	44,8	42,5	32	20	29	48	53
135	47,4	44,6	42,6	32	20	28	48	53
150	47,2	44,5	42,6	31,8	20	28	48	53
165	47,3	44,3	42,5	31,6	20	28	48	52
180	47,3	44,5	42,5	31,6	20	27	47	52
195	47,2	44,5	42,6	31,7	20	27	47	52
210	47,3	44,6	42,6	31,5	20	27	48	52
225	47,3	44,4	42,5	31,3	20	27	48	51
240	47,3	44,3	42,6	31,4	20	27	47	51
255	47,3	44,4	42,5	31,3	20	27	47	50
270	47,3	44,5	42,6	31,3	20	27	47	50
285	47,3	44,5	42,6	31,2	20	26	47	50
300	47,2	44,6	42,5	31,2	20	26	47	49
315	47,4	44,5	42,6	31,2	20	26	46	49
330	47,5	44,5	42,6	31,3	20	26	46	50
345	47,3	44,6	42,5	31,2	20	26	47	50
360	47,3	44,5	42,5	31,1	20	26	47	50
375	47,4	44,5	42,5	31,2	20	26	47	50
390	47,3	44,6	42,5	31,2	20	26	47	50
405	47,3	44,5	42,5	31,2	20	26	47	50
420	47,4	44,5	42,5	31,2	20	25	47	50
435	47,2	44,6	42,5	31,1	20	25	47	50
450	47,3	44,5	42,5	31,2	20	25	47	50
465	47,3	44,5	42,5	31,2	20	25	47	50
480	47,3	44,5	42,5	31,2	20	25	47	50

## Hasil Data Tanpa Adanya Beban

Time	T1	T2	T3	T4	RH1	RH2	RH3	RH4
0	27,5	27,6	27,8	27,7	80	81	85	82
15	37,3	32,3	31,1	25,2	40	56	69	59
30	40,6	35,1	33,9	27,4	32	50	65	59
45	44,2	38,8	37,1	29,2	27	37	62	57
60	47,5	43,4	38,2	30,8	22	36	59	55
75	48,4	44,2	41,1	31,9	22	34	54	56
90	48,3	44,3	41,6	32,2	21	32	53	56
105	47,7	44,9	42,5	32,3	21	29	52	56
120	47,3	45,1	43,8	32,3	21	28	51	55
135	47,4	45	43,7	32,4	20	28	50	55
150	47,2	45,6	43	32,6	20	28	49	54
165	47,5	44,8	42,9	32,5	20	28	49	53
180	47,3	44,8	42,8	32,5	20	28	49	53
195	47,4	44,8	42,6	32,3	20	28	49	53
210	47,2	44,7	42,6	32,2	20	28	49	52
225	46,8	44,9	42,5	32,4	20	27	48	52
240	47,4	44,8	42,5	32,6	20	27	49	51
255	47,4	44,8	42,6	32,6	20	27	48	51
270	47,6	44,7	42,6	32,6	20	27	48	51
285	47,6	44,7	42,5	32,4	20	27	48	51
300	47,6	44,8	42,5	32,6	20	27	48	51
315	47,6	44,8	42,5	32,5	20	27	48	51
330	47,6	44,8	42,6	32,6	20	27	47	51
345	47,6	44,7	42,6	32,6	20	26	47	50
360	47,6	44,8	42,7	32,6	20	26	47	51
375	47,6	44,8	42,7	32,6	20	26	47	50
390	47,6	44,8	42,7	32,6	20	26	47	50
405	47,7	44,9	42,6	32,6	20	26	47	49
420	47,8	44,9	42,7	32,6	20	26	47	49
435	47,6	44,8	42,7	32,6	20	25	47	49
450	47,6	44,7	42,7	32,6	20	25	47	49
465	47,6	44,9	42,7	32,6	20	25	47	49
480	47,6	44,9	42,7	32,6	20	25	47	49

## Hasil Data Dari Psychometric Calculator

w1	h1	w2	h2	w3	h3	w4	h4
18,2	74	19,4	77,8	21,2	82,1	19	76,3
13,3	72,2	15,6	72	17,6	75,2	11,4	54,6
14,4	78,5	18	81,9	21,8	90,2	12,9	60,3
15	83,2	18,8	86,7	22,3	93,6	14	65
17,2	93	20	94,3	22,8	97,2	17	76,3
14,7	86	18,1	91,2	23,5	100,1	17	76,3
14,6	85,8	17,7	90,3	26,2	109,3	16,7	75,5
14,5	85,5	18	91,4	26,1	109,3	16,4	71,1
13,8	83,3	17,5	90,2	26	109,8	16	73
13,7	83	16,7	88	26,1	110,2	16	73
13,5	82,4	16,6	87,6	26,1	110,2	15,8	72,3
13,6	82,8	16,4	87	26	109,8	15,3	70,9
13,6	82,8	16	86	25,4	108,3	15,3	70,9
13,5	82,4	16	86	25,6	108,8	15,4	71,2
13,6	82,8	16,1	86,3	26,1	110,2	15,2	70,5
13,6	82,8	15,9	85,7	26	109,8	14,8	69,2
13,6	82,8	15,8	85,4	25,6	108,8	14,8	69,5
13,6	82,8	15,9	5,7	25,4	108,3	14,4	68,4
13,6	82,8	16	86	25,6	108,8	14,4	68,4
13,6	82,8	15,4	84,4	25,6	108,8	14,3	68,1
13,5	82,4	15,4	84,8	25,4	108,3	14	67,3
13,7	83	15,4	84,4	25	107,3	14	67,3
13,7	83,4	15,4	84,4	25	107,3	14,4	68,4
13,6	82,8	15,4	84,8	25,4	108,3	14,3	68,1
13,6	82,8	15,4	84,4	25,4	108,3	14,3	67,7
13,7	83	15,4	84,4	25,4	108,3	14,3	68,1
13,6	82,8	15,4	84,8	25,4	108,3	14,3	68,1
13,6	82,8	15,4	84,4	25,4	108,3	14,3	68,1
13,7	83	14,8	82,3	25,4	108,3	14,3	68,1
13,5	82,4	14,8	83,2	25,4	108,3	14,3	67,7
13,6	82,8	14,8	82,9	25,4	108,3	14,3	68,1
13,6	82,8	14,8	82,9	25,4	108,3	14,3	68,1
13,6	82,8	14,8	82,9	25,4	108,3	14,3	68,1

## Pengolahan Data Mass Balance

w3	w5	mev	mda	delta mda	w4	mw
21,2	19	0	0	0	0	0
17,6	11,4	0,4667	0,23335	0,040354	13,37143	0,986737
21,8	12,9	1,6667	0,438605	0,109651	16,125	2,489085
22,3	14	1,2	0,342857	0,086857	17,54667	1,629714
22,8	17	1,93333	0,690475	0,112403	19,76744	2,093906
23,5	17	1,5333	0,283944	0,065674	20,93197	0,729177
26,2	16,7	1,1333	0,133329	0,02831	20,24589	0,793858
26,1	16,4	1,4	0,17284	0,04172	20,35862	0,992337
26	16	1,5333	0,180388	0,048365	20,28986	1,030043
26,1	16	1,13333	0,120567	0,026402	19,50365	0,795302
26,1	15,8	1	0,105263	0,024172	19,42815	0,7023
26	15,3	0,9333	0,097219	0,020016	18,45	0,734002
25,4	15,3	0,8	0,085106	0,015019	18	0,629787
25,6	15,4	1	0,104167	0,01929	18,25185	0,765432
26,1	15,2	0,93333	0,093333	0,017157	17,99412	0,756546
26	14,8	0,8667	0,085812	0,014512	17,30294	0,746311
25,6	14,8	0,6667	0,068031	0,011005	17,19412	0,571857
25,4	14,4	0,6667	0,070179	0,011868	16,83529	0,601062
25,6	14,4	0,6667	0,069448	0,012256	16,94118	0,601337
25,6	14,3	0,4	0,039216	0,00519	16,19265	0,368916
25,4	14	0,4667	0,04667	0,006568	15,97037	0,440081
25	14	0,4667	0,048615	0,006032	15,73723	0,450306
25	14,4	0,5333	0,055552	0,006893	16,18686	0,489588
25,4	14,3	0,5333	0,05333	0,007058	16,19265	0,491028
25,4	14,3	0,3333	0,03333	0,004411	16,19265	0,306881
25,4	14,3	0,2667	0,02667	0,003309	16,07445	0,248712
25,4	14,3	0,3333	0,03333	0,004411	16,19265	0,306881
25,4	14,3	0,3333	0,03333	0,004411	16,19265	0,306881
25,4	14,3	0,2	0,018868	0,001515	15,44818	0,18777
25,4	14,3	0,2667	0,02516	0,002423	15,67704	0,244633
25,4	14,3	0,3333	0,031443	0,002774	15,56176	0,309348
25,4	14,3	0,2667	0,02516	0,00222	15,56176	0,247534
25,4	14,3	0,2	0,018868	0,001665	15,56176	0,185627
			0,117105	0,023149	16,70548	0,673727

## Pengolahan Data Energy Balance

Qevap	Qloss 12	Qloss23+Qsensi	h4	Qcond-Qloss51	Kinerja
0	0	0	0	0	0
4,817186165	0,04667	35,18918	50,36316	67,02552404	0,553663
9,978269737	1,491257895	147,4766337	55,7	199,6761426	0,758238
7,8208	1,2	110,8457143	61,428	136,2957714	0,844367
13,40806105	0,8976175	189,3420545	75,84419	188,1537952	1,07207
3,391301096	1,476511111	151,5638656	75,65238	63,9342446	2,46167
1,664882538	0,599982353	117,7898688	74,82055	76,13822633	1,547622
14,67586207	1,019753086	145,1938272	2,231034	82,2164751	2,103919
2,356157928	1,244678824	159,3188894	71,36449	97,7190521	1,633584
1,469685588	0,602835106	115,6695889	71,66423	74,64549822	1,54413
1,307290448	0,547368421	102,0789474	70,73852	65,86548928	1,544343
1,395089063	0,40831875	94,5199575	69,21176	68,64681703	1,372506
1,191489362	0,272340426	80,13787234	69,45294	58,28705882	1,370334
1,382716049	0,375	100,575	69,73704	71,09637346	1,408619
1,359024558	0,3266655	95,2836597	68,99265	71,581662	1,325114
1,364408911	0,248854455	88,13137634	67,52574	70,48104598	1,245189
1,051173004	0,176879592	66,79517633	67,94706	53,14839558	1,251569
1,18148322	5,410796842	72,40362	66,59044	55,85673491	1,192555
1,176529412	0,222233333	67,0533525	66,51176	56,11448859	1,191707
0,652768166	0,062745098	40,23686275	66,64412	34,57435986	1,157965
0,803899393	0,112008	46,926685	65,69556	41,22758659	1,13374
0,857958683	0,068060417	46,24316396	65,83577	41,52881264	1,109637
0,936681113	0,055552083	52,84225271	67,07226	45,10844575	1,16749
0,887709221	0,10666	53,623315	66,64412	45,99745439	1,160948
0,569893985	0,053328	33,393327	66,24412	28,61124643	1,162452
0,446693299	0,037338	26,720673	66,78467	23,21685406	1,145502
0,554797456	0,06666	33,513315	66,69706	28,74909539	1,160875
0,554797456	0,053328	33,393327	66,64412	28,62457843	1,161275
0,303704724	-0,013207547	19,75056604	67,21679	17,30712299	1,132713
0,405473459	0,020128302	26,42141547	66,60222	22,60691962	1,161631
0,503001859	0,00314434	32,89545226	67,12941	28,49562407	1,146616
0,402492037	0,002516038	26,32228358	67,12941	22,80162898	1,146616
0,301831299	0,001886792	19,73924528	67,12941	17,09908435	1,146616
2,399185223	0,52114881	73,67849904	63,31045	60,08580633	1,227736

mev*hw	Qcond-Qevap	Kinerja
0	0	0
2066,5476	3732,500272	0,553663081
8630,1726	11381,87237	0,758238392
6508,8	7708,498286	0,844366796
11240,38062	10484,74405	1,072070102
8942,2056	3632,57661	2,461670203
6915,3966	4468,400627	1,547622332
8526	4052,436782	2,103919311
9346,9968	5721,77365	1,63358381
6779,58006	4390,548758	1,544130457
5982	3873,49193	1,544342962
5538,2022	4035,103678	1,372505552
4694,4	3425,734168	1,370333999
5892	4182,819444	1,408619253
5583,18006	4213,358246	1,325114014
5163,7986	4146,998224	1,245189489
3912,1956	3125,833355	1,251568832
3912,1956	3280,515101	1,192555278
3928,1964	3296,277551	1,191706809
2356,8	2035,295502	1,15796453
2749,7964	2425,421232	1,133739725
2707,7934	2440,251238	1,109637138
3094,2066	2650,305878	1,167490374
3142,2036	2706,58471	1,160947813
1955,8044	1682,481147	1,162452491
1564,9956	1366,209645	1,145501794
1963,8036	1691,657876	1,160875156
1955,8044	1684,186859	1,161275182
1155,6	1020,205096	1,132713417
1547,3934	1332,08677	1,161631085
1925,8074	1679,557333	1,146616053
1540,9926	1343,948217	1,146616053
1155,6	1007,835183	1,146616053