

BAB II

DASAR TEORI

2.1 RUMPUT LAUT

Rumput laut telah lama digunakan sebagai makanan maupun obat-obatan di Jepang, Cina, Amerika, dan Eropa. Diantaranya sebagai nori, kombu, pudding atau dalam bentuk lainnya seperti saus, sop dan dalam bentuk mentah sebagai sayuran. Adapun pemanfaatan rumput laut sebagai makanan karena mempunyai gizi yang cukup tinggi yang sebagian besar terletak pada karbohidrat di samping lemak dan protein yang terdapat di dalamnya

2.1.1 Komposisi Kimia

Adapun pemanfaatan rumput laut sebagai makanan karena mempunyai gizi yang cukup tinggi yang sebagian besar terletak pada karbohidrat di samping lemak dan protein yang terdapat di dalamnya. Hasil analisa dari sebagian jenis rumput laut yang berasal dari daerah Sulawesi Selatan dan Bali dapat dilihat pada tabel berikut ini

Tabel 2.1 Hasil Analisa Rumput Laut

Jenis analisa	<i>E. spinosum</i> (Bali)%	<i>E. spinosum</i> (Sul Sel)%	<i>E. spinosum</i> (Bali)%	<i>G. gigas</i> (Bali)%
Kadar air	12,90	11,80	13,90	12,90
Protein (Crude protein)	5,12	9,20	2,69	7,30
Lemak	0,13	0,16	0,37	0,09
Karbohidrat	13,38	10,64	5,70	4,94
Serat kasar	1,39	1,73	0,95	2,50
Abu	14,21	4,79	17,09	12,54
Mineral:Ca	52,85 ppm	69,25 ppm	22,39 ppm	29,925 ppm
Fe	0,108 ppm	0,326 ppm	0,121 ppm	0,701 ppm
Cu	0,768 ppm	1,869 ppm	2,736 ppm	3,581 ppm
Pb	=	0,015 ppm	0,040 ppm	0,190 ppm
Vitamin B ₁ (Thiamin)	0,21 mg/100g	0,10 mg/100g	0,14 mg/100g	0,019 mg/100g
Vitamin B ₂ (Riboflacin)	2,26 mg/100g	8,45 mg/100g	2,7 mg/100g	4,00 mg/100g
Vitamin C	43 mg/100g	41 mg/100g	12 mg/100g	12 mg/100g
Carrageenan	65,75%	67,51%	61,52%	=
Agar	=	=	=	47,34%

Sumber: Hasil Analisa di FTDC

Disamping digunakan sebagai sebagai makanan, rumput laut juga dapat digunakan sebagai penghasil alginat, agar-agar, carrageenan, fulceran, pupuk, makanan ternak, dan Yodium.

Dalam rumput laut tersebut memiliki beberapa zat - zat yang terkandung dan sangat berpengaruh pada saat pembentukan agar - agar, diantara zat - zat tersebut adalah “keragaan” yang merupakan zat penyusun yang besar dari berat kering rumput laut. Dalam literature dapat disimpulkan bahwa karaginan merupakan senyawa hidrokoloid yang terdiri atas ester kalium, natrium, magnesium dan kalium sulfat dengan galaktosa 3,6 anhidro galaktosa kopolimer. Karaginan adalah suatu bentuk polisakarida linear dengan berat molekul di atas 100 kDa (Winarno, 1996 ; WHO 1999). Karaginan tersusun dari perulangan unit-unit galaktosa dan 3,6-anhidro galaktosa (3,6-AG). Keduanya baik yang berikatan dengan sulfat atau tidak, dihubungkan dengan ikatan glikosidik α -1,3 dan β -1,4 secara bergantian (FMC Corp, 1977). Untuk sifat dasar karaginan terdiri dari tiga tipe karaginan yaitu kappa, iota dan lambda karaginan. Tipe karaginan yang paling banyak dalam aplikasi pangan adalah kappa karaginan. Sebagai perbandingan untuk ketiga tipe keragian diatas, akan dijelaskan melalui table berikut ini

Tabel 2.2 Struktur Kimia Keragian

Fraksi karaginan	Monomer
Kappa	D-galaktosa 4-sulfat
	3,6-anhidro-D-galaktosa
Iota	D-galaktosa 4-sulfat
	3,6-anhidro-D-galaktosa 2-sulfat
Lambda	D-galaktosa 2-sulfat
	D-galaktosa 2,6-disulfat

sumber : Towle (1973)

2.1.2 Pengolahan Rumput Laut menjadi Agar-Agar

Salah satu produk olahan rumput laut yang dikenal luas adalah agar-agar. Agar-agar merupakan senyawa ester asam sulfat dari senyawa galaktan, tidak larut

dengan air dingin tetapi dengan air panas dan membentuk gel. Beberapa sifat dari agar-agar :

1. Pada suhu 25°C dengan kemurnian tinggi tidak larut dengan air dingin tetapi larut dalam air panas.
2. Pada suhu 32-39°C berbentuk padat dan mencair pada suhu 60-97°C pada konsentrasi 1.5%.
3. Dalam keadaan kering agar-agar sangat stabil, pada suhu tinggi dan pH rendah agar-agar mengalami degradasi.
4. Viskositas agar-agar pada suhu 45°C, pH 4.5-9 dengan konsentrasi larutan 1.5% adalah 2-10 cp.

Proses pengolahan :

1. Rumput laut yang telah melewati proses pembersihan awal dicuci lagi supaya lebih bersih. Pencucian dilakukan dalam drum-drum berisi air yang mengalir secara over flow atau pencucian dengan mengalirkan air tawar ke dalam drum berlubang arah horizontal yang berisi rumput laut. Drum berputar mengikuti porosnya.
2. Setelah dicuci bersih direndam dalam kaporit 0,25% selama 4-6 jam sambil diaduk, sehingga diperoleh rumput laut berwarna putih dan bersih. Setelah direndam dicuci kembali untuk menghilangkan bau kaporit, kemudian direndam dalam asam sulfat encer 10% sampai lunak.
3. Rumput laut hasil rendaman dengan asam sulfat dimasak dengan menambahkan air dalam suatu tangki pemasak. Pemanasan dilakukan sampai suhu operasi 90-100°C, pH = 5-6 (dalam suasana asam), dimana pH diatur dengan jalan menambahkan asam cuka 0,5%. Di samping untuk mempertahankan pH, asam cuka juga berfungsi sebagai stabilizer sehingga diperoleh tekstur molekul yang konsisten. Pemasakan dilakukan selama 4-8 jam sambil diaduk sampai merata.

4. Setelah rumput laut hancur semua, dilakukan pemisahan melalui penyaringan dengan filter press. Filtrat ditampung, kemudian didinginkan selama lebih kurang 7 jam (sampai membeku).
5. Hasil pembekuan dihancurkan dan dipress dengan menggunakan kain. Hasil pengepresan adalah agar-agar dalam bentuk lembaran dengan ukuran sekitar 40× 30 cm.
6. Lembaran agar-agar diangin-anginkan kemudian dijemur di bawah sinar matahari sampai kering. Lembaran agar-agar yang sudah kering dihancurkan dengan mesin penghancur sehingga berbentuk agar-agar dengan ukuran 5×5 mm. Agar-agar hancur dimasukkan ke mesin pembuat bubuk (mill) sehingga diperoleh agar-agar powder yang berwarna putih. Dapat ditambahkan vanili untuk menambah aroma.

2.2 PRINSIP DASAR PENGERINGAN

Pengeringan adalah proses kompleks yang meliputi perpindahan panas dan massa secara transient serta beberapa laju proses, seperti transformasi fisik atau kimia. Perubahan fisik yang mungkin terjadi meliputi: pengkerutan, penggumpalan, kristalisasi, dan transisi gelas. Pada beberapa kasus, dapat terjadi reaksi kimia atau biokimia yang diinginkan atau tidak diinginkan yang menyebabkan perubahan warna, tekstur, aroma, atau sifat lain dari produk.

Pengeringan terjadi melalui penguapan uap air dengan adanya pemberian panas ke sample uji. Panas dapat diberikan melalui konveksi (pengering langsung), konduksi (pengering sentuh atau tak langsung), radiasi atau secara volumetric dengan menempatkan sample uji tersebut dalam medan elektromagnetik gelombang mikro atau frekuensi radio.

Proses pengeringan suatu material terjadi melalui dua proses yaitu proses pemanasan (*heating*) dan proses pengeringan (*drying*). Proses pemanasan (*heating*) dilakukan untuk memperoleh udara panas dan untuk menurunkan kelembaban relatif dari udara sekitar. Sedangkan proses pengeringan (*drying*) dilakukan untuk menurunkan temperatur udara karena terjadi perpindahan panas dari udara ke bahan

yang akan dikeringkan (udara memberikan kalor laten untuk menguapkan kandungan air dari bahan yang dikeringkan).

Proses pengeringan diasumsikan secara adiabatik, yaitu : kalor yang diperlukan untuk menguapkan kandungan air dari bahan semata-mata berasal dari udara pengering saja (tidak ada kalor yang masuk dari lingkungan). Selama proses pengeringan adiabatik ini, akan terjadi penurunan temperatur bola kering dan kenaikan kelembaban, kelembaban relatif, tekanan uap air serta temperatur *dew point* sedangkan entalpi dan temperatur bola basah dapat dianggap konstan.

Pengeringan material-material biologis terutama makanan dilakukan untuk mencegah berkembangnya mikroorganisme yang menyebabkan makanan menjadi busuk dan untuk mencegah bekerjanya enzim-enzim yang menyebabkan terjadinya perubahan kimiawi pada makanan. Hal ini terjadi karena mikroorganisme dan enzim tersebut tidak dapat berkembangbiak dan berfungsi pada lingkungan yang kurang kadar airnya.

2.3 KANDUNGAN KELEMBABAN (*MOISTURE CONTENT*)

Untuk menyatakan kadar air dari suatu bahan pangan terdapat dua cara yaitu :

1. Basis berat basah (*Wet weight basis*). Basis berat basah (w.w.b) diperoleh dengan membagi berat air dalam bahan pangan dengan berat total bahan pangan.

$$w.w.b = \frac{M_w}{M_w + M_d} 100\% \quad (2.1)$$

2. Basis berat kering (*Dry weight basis*). Basis berat kering (d.w.b) diperoleh dengan membagi berat air dengan berat kering bahan pangan.

$$d.w.b = \frac{M_w}{M_d} 100\% \quad (2.2)$$

Hubungan antara w.w.b dengan d.w.b ditunjukkan oleh persamaan :

$$d.w.b = \frac{w.w.b}{100 - w.w.b} 100\% \quad (2.3)$$

2.4 KADAR AIR KESEIMBANGAN (*EQUILIBRIUM MOISTURE CONTENT (EMC)*)

Jika udara tetap berhubungan dengan suatu bahan dalam waktu cukup lama maka tekanan parsial uap air di udara akan mencapai keseimbangan dengan tekanan parsial uap air dalam bahan. EMC terjadi pada saat kadar air suatu bahan higroskopik seimbang dengan kelembaban relative udara (ASHRAE Fundamentals Handbook, 2001). Kandungan air yang terkandung dalam suatu material membentuk suatu tekanan uap yang besarnya tergantung dari sifat uap air yang berada dalam material, sifat material itu sendiri dan temperatur keduanya. Sedangkan udara juga memiliki kesetimbangan uap air dengan jumlah tertentu. Kandungan uap air relatif di udara tersebut biasanya disebut sebagai *Relatif Humidity (RH)*. Setiap proses yang terjadi pada udara, baik itu penyerapan ataupun pelepasan air, pada akhirnya akan menuju suatu kondisi setimbang dimana tidak terjadi lagi proses pelepasan atau penyerapan air. Nilai EMC ini sangat bergantung pada kelembaban dan temperature lingkungan tersebut. Selain itu juga bergantung pada spesies, varietas, dan kematangan dari bahan pangan, biji-bijian dan hasil pertanian lainnya.

2.5 PENGERINGAN SEMPROT (*SPRAY DRYING*)

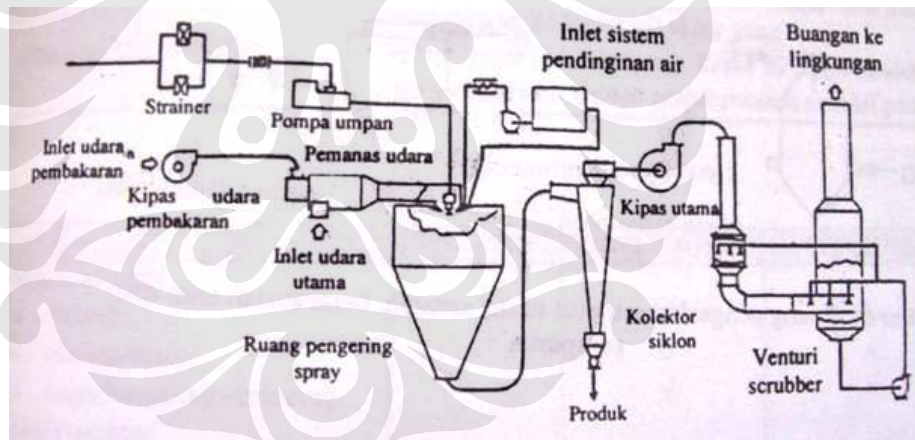
Pengeringan semprot (*spray drying*) adalah suatu metode pengeringan yang unik karena meliputi dua unsur yaitu formasi partikel dan pengeringan. Karakteristik dari bubuk yang dihasilkan dapat dikontrol, dan properties bubuk dapat dijaga konstan selama operasi berlangsung. Dengan desain pengering semprot (*spray dryer*) yang tersedia, dimungkinkan untuk memilih tipe alat untuk menghasilkan baik bubuk yang halus maupun kasar, aglomerat, maupun granula

Spray drying meliputi atomisasi sampel bahan menjadi *spray*, dan kontak antara *spray* dan media pengeringan menghasilkan penguapan dari kelembaban. Pengeringan dari *spray* tersebut berlanjut sampai tercapai kandungan kelembaban dalam partikel yang telah kering telah mencapai batasnya.

Pengertian dari atomisasi adalah proses perpecahan partikel *liquid* menjadi jutaan tetesan (*droplets*) yang membentuk *spray*. Satu kubik meter *liquid* membentuk

hampir 2×10^{12} tetesan yang seragam dengan ukuran $100 \mu\text{m}$. Energi untuk proses ini dikontrol oleh sentrifugal, tekanan, kinetik atau efek *sonic*. Selama proses kontak *spray* dengan udara, tetesan bertemu dengan udara panas dan penguapan kelembaban terjadi di tetesan. Penguapan terjadi sangat cepat tergantung dari luas area tetesan pada *spray*, sebagai contoh 2×10^{12} tetesan dengan diameter $100 \mu\text{m}$ mempunyai total luas area 60000 m^2 .

Saat ini lebih dari 20000 pengering semprot (*spray dryer*) digunakan secara komersial untuk pengeringan produk-produk agrokimia, bioteknologi, bahan-bahan kimia dasar dan berat, susu, zat pewarna, konsentrat mineral dan bahan farmasi, mulai dari kapasitas beberapa kg per jam hingga 50 ton per jam penguapan. Sampel bahan cair seperti larutan, suspensi, atau emulsi dapat diubah menjadi bentuk bubuk, butiran atau aglomerat dalam satu langkah operasi dalam pengering semprot. Gambar di bawah merupakan skema proses pengering semprot.



Gambar 2.1 Skema Proses pada Instalasi *Spray Dryer*

Sampel bahan yang diatomisasi dalam bentuk percikan disentuh dengan gas panas dalam ruang pengering. Pemilihan dan rancangan pengatom yang tepat sangat penting terhadap operasi *spray dryer* karena dipengaruhi oleh jenis sampel bahan (kekentalan), sifat abrasive, laju umpan, ukuran partikel yang diinginkan dan

sebaran ukuran serta rancangan geometri ruang dan mode aliran, seperti aliran searah, berlawanan, atau campuran.

2.5.1 Kelebihan dari *Spray Drying*

1. Bubuk yang dihasilkan memiliki ukuran partikel dan kadar kelembaban yang spesifik tanpa mengacu pada kapasitas pengering dan *heat sensitivity* dari produk.
2. Spesifikasi kualitas bubuk tetap konstan selama operasi pengeringan berlangsung tanpa bergantung dari lama pengeringan selama dijaga konstan.
3. Operasi *spray dryer* berlanjut dan mudah, operasi sangat *fleksibel* dengan kontrol otomatis, dan waktu respon sangat cepat. Seorang operator dapat menjalankan lebih dari satu pengering jika letaknya berdekatan.
4. Desain pengering yang sangat banyak dan cukup tersedia. Spesifikasi produk yang diinginkan mudah ditemui.
5. *Spray drying* dapat digunakan baik yang material yang mempunyai *heat sensitive* dan *heat resistant* tertentu.
6. Sampel bahan yang berbentuk gel, emulsi, pasta, atau kental dapat ditangani asal mudah dipompa.

Kekurangan dari *spray drying* adalah biaya pemasangan yang mahal dan memiliki efisiensi thermal yang buruk.

2.5.2 Komponen Dasar pada *Spray Dryer*

Spray drying mengandung empat tahap proses :

1. Atomisasi sampel bahan menjadi *spray*.
2. Kontak *spray* – udara (*mixing and flow*).
3. Pengeringan pada *spray* (*moisture / volatile evaporation*).
4. Pemisahan produk kering dari udara.

2.6 KARAKTERISTIK UDARA

Dalam laju penguapan tetesan yang sangat berperan penting adalah udara. Udara berada diatas permukaan lapisan bumi disebut dengan atmosfer, atau atmosfer udara. Pada atmosfer bertekanan rendah (*lower atmosfer*) atau homosphere, terdiri dari udara basah (*moist air*), dimana terdiri dari campuran uap air dan udara kering.

Komposisi udara kering diperkirakan berdasarkan volumenya terdiri dari : 79.08 % Nitrogen, 20.95 % Oksigen, 0.93 % Argon, 0.03 % Karbon Dioksida, 0.01 % lain-lain gas (seperti neon, sulfur dioksida)^[1].

Kandungan uap air pada udara basah antara temperatur 0 – 100^o F tidak lebih dari 0.05 – 3 %. Variasi uap air pada udara basah besar pengaruhnya terhadap karakteristik dari udara basah tersebut.

Faktor yang sangat berperan dalam laju penguapan tetesan (*droplet*) adalah udara, dalam bentuk udara kering (*dry air*) yang berada dalam campuran biner dengan uap air (*water vapor*).

Tetapan gas universal (\mathfrak{R}) berdasarkan skala karbon-12 adalah:

$$\mathfrak{R} = 8.314,5 \text{ [J/(kmol.K)]} \quad (2.4)$$

Tetapan gas tertentu (R_i) dengan massa molekul relatif M_i digunakan rumus^[1]:

$$R_i = \frac{\mathfrak{R}}{M_i} \quad (2.5)$$

Maka tetapan gas untuk udara kering (R_{da}) berdasarkan skala karbon-12 adalah

$$R_{da} = \frac{8314,41}{28,9} = 287,7 \text{ [J/kg.K]} \quad (2.6)$$

dan tetapan gas untuk uap air (R_v) berdasarkan skala karbon-12 adalah:

$$R_v = \frac{8314,41}{18} = 461,9 \text{ [J/kg.K]} \quad (2.7)$$

Udara dianggap sebagai gas ideal, sehingga hukum-hukum yang berlaku untuk gas ideal akan berlaku juga pada udara yaitu^[2]:

$$PV = mR_a T \quad (2.8)$$

P = tekanan atmosfer udara basah [Pa]

V = volume udara basah [m^3]

m = massa udara basah [kg]

R_a = konstanta gas [kJ/kg.K]

T = temperatur udara basah [K]

2.7 THERMODINAMIKA UDARA BASAH

Kelembaban, temperatur, tekanan, entalpi dan volume jenis adalah sifat termodinamika dari udara basah. Udara basah merupakan campuran biner antara udara kering dengan uap air, sehingga:

$$m = m_{da} + m_v \quad (2.9)$$

m_{da} = massa udara kering [kg]

m_v = massa uap air [kg]

Persamaan mol yang setara dengan pers.(2-9) adalah:

$$n = n_{da} + n_v \quad (2.10)$$

n = mole udara basah [kmole]

n_{da} = mole udara kering [kmole]

n_v = mole uap air [kmole]

Jika pers.(2.10) dibagi dengan jumlah mole udara basah (n) maka didapat:

$$\frac{n_{da}}{n} + \frac{n_v}{n} = 1 \quad (2.11)$$

$$x_{da} + x_v = 1 \quad (2.12)$$

$$x_o = \frac{P_v}{101325} \quad (2.13)$$

$$X = \frac{n_v}{n_a} = \frac{n_v}{n_{da}} \times \frac{n_{da}}{n_a} \quad (2.14)$$

$$pv = nRT = \frac{n}{M} RT \quad (2.15)$$

$$\frac{n}{v} = \frac{p}{RT} = \frac{101325}{8314.5 \cdot T_\infty} = C \quad (2.16)$$

$$x_o = \frac{\omega}{0.622(1 + \omega)} \quad (2.17)$$

x_{da} = fraksi mole udara kering

x_v = fraksi mole uap air

2.7.1 Kelembaban

Kelembaban adalah konsentrasi uap air di udara. Angka konsentrasi ini dapat diekspresikan dalam kelembaban relatif (kelembaban spesifik).

2.7.1.1 Kelembaban relatif (relative humidity)

Kelembaban relatif (RH) adalah perbandingan fraksi mol uap air dalam udara basah terhadap fraksi mol uap air yang berada dalam keadaan jenuh pada temperatur dan tekanan yang sama. Kelembaban relatif dinyatakan dalam persamaan berikut^[3]:

$$RH(\phi) = \frac{x_v}{x_{ws}} \quad (2.18)$$

x_{ws} = fraksi mol uap air jenuh pada suhu dan tekanan udara.

Pada diagram psikometrik, garis kelembaban relatif ditunjukkan dengan garis lengkung parabolik yang merapat dari kiri bawah dan semakin melebar ke kanan atas dimana nilainya akan terus bertambah apabila garis kelembaban relatif mendekati garis saturasi.

2.7.1.2 Rasio kelembaban (*humidity ratio*)

Rasio kelembaban (ω) disebut juga *moisture content* atau *mixing ratio*, adalah perbandingan massa uap air terhadap massa udara kering yang terkandung dalam udara basah pada tekanan dan temperatur tertentu. Persamaan dasarnya adalah:

$$\omega = \frac{m_v}{m_{da}} \quad (2.19)$$

Dari pers.(2-9) dan pers.(2-14) didapat:

$$m = (1 + \omega)m_{da} \quad (2.20)$$

ω = rasio kelembaban (*humidity ratio*)

m_v = massa uap air [kg]

m_{da} = massa udara kering [kg]

Uap air dan udara dianggap juga sebagai gas ideal, maka untuk menghitung perbandingan kelembaban memakai persamaan $p_v = R_v T$, serta kalor spesifik tetap. Udara dianggap sebagai gas ideal karena suhunya cukup tinggi dibandingkan suhu jenuhnya, dan uap air dianggap ideal karena tekanannya cukup rendah dibandingkan dengan tekanan jenuhnya (Stoecker, 1994).

$$\omega = \frac{m_v}{m_{da}} = \frac{p_v \cdot V / R_v \cdot T}{p_{da} \cdot V / R_{da} \cdot T} = \frac{p_v / R_v}{(p_t - p_v) / R_{da}} \quad (2.21)$$

ω = rasio kelembaban [kg uap air/kg udara kering]

V = volume campuran udara-uap air [m^3]

P_t = tekanan atmosfer = $p_a + p_s$ [Pa]

p_{da} = tekanan parsial udara kering [Pa]

p_w = tekanan parsial uap air dalam keadaan jenuh [Pa]

R_{da} = tetapan gas untuk udara kering = 287 [J/kg.K]

R_v = tetapan gas untuk uap air = 461,5 [J/kg.K]

T = temperatur campuran udara-uap air [K]

dengan mensubstitusi nilai R_a dan R_s ke dalam persamaan (2.21) maka diperoleh

$$\omega = \left(\frac{287}{461,5} \right) \left(\frac{p_v}{p - p_v} \right) = 0,622 \left(\frac{p_v}{p - p_v} \right) = 0,622 \frac{p_v}{p_{da}} \quad (2.22)$$

$$\rho_v = \rho \cdot \omega_v \quad (2.23)$$

$$\rho_o = \frac{m_v}{v} = \frac{m_v}{m} \cdot \frac{m}{v} \quad (2.24)$$

$$\rho_o = \omega_v \cdot \rho \quad (2.25)$$

$$C = \frac{n}{v} = \frac{m/M}{v} = \frac{\rho}{M} \quad (2.26)$$

$$n = \frac{m}{M} \quad (2.27)$$

$$\frac{P_v}{P_{da}} = \frac{n_v}{n_{da}} = \frac{m_v/18}{m_{da}/28,9} = \frac{\omega}{0,622} \quad (2.28)$$

$$\gamma = \omega = 0,622 \frac{p_v}{p_a - p_v} \quad (2.29)$$

$$p_a - p_v = 0,622 \cdot p_v \quad (2.30)$$

$$p_v = \frac{\gamma}{\gamma + 0,622} p_a \quad (2.31)$$

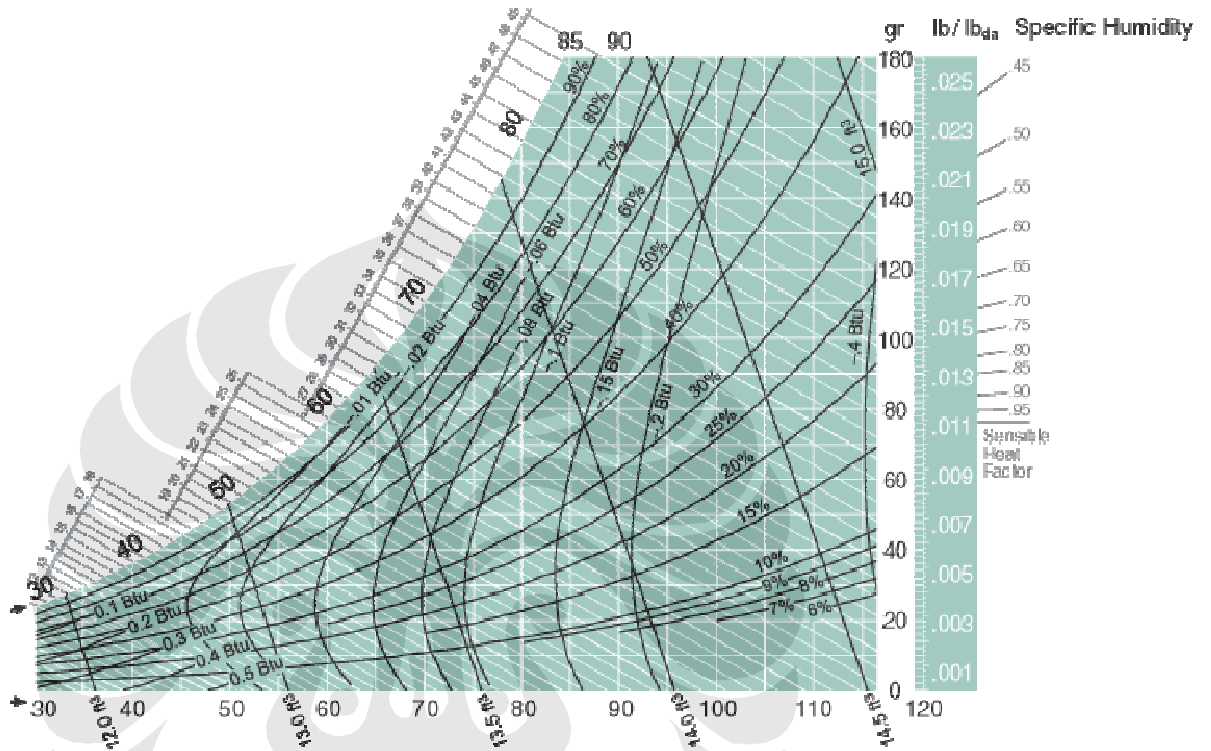
$$\omega_o = \frac{0,622 \cdot x_o}{1 + 0,378 \cdot x_o} \quad (2.32)$$

ω_o : Td = tabel uap Pv

Pada diagram psikometrik, garis rasio kelembaban ditunjukkan dengan garis horizontal yang semakin bertambah besar dari bawah ke atas.

2.8 PSYCHROMETRIC CHART

Psychrometric chart digunakan untuk menentukan property udara. Psychrometric chart pada umumnya digambar pada tekanan 760 mmHg.



Gambar 2.2 Psychrometric Chart

Beberapa istilah yang berhubungan dengan psychrometric chart.

1. **Udara kering.** Udara kering murni merupakan campuran sejumlah gas seperti Nitrogen, Oksigen, Hidrogen, Argon, dan lain-lain. Nitrogen dan Oksigen menduduki porsi terbesar yaitu 78 % dan 21 %.

$$m = m_{da} + m_v \quad (2.33)$$

m_{da} = massa udara kering [kg]

m_v = massa uap air [kg]

2. **Udara lembab (*moist air*).** Merupakan campuran udara kering dengan uap air. Jumlah uap air yang terkandung di dalam udara sangat bergantung pada tekanan absolute dan temperature campuran.

3. **Udara saturasi.** Merupakan campuran udara kering dengan uap air dimana jumlah uap air di dalam udara sudah maksimum (udara berada dalam keadaan jenuh).
4. **Kelembaban (*Humidity/Specific humidity/Humidity ratio*).** Didefinisikan sebagai massa uap air dalam satu massa udara kering.

$$\omega = \frac{m_v}{m_{da}} \quad (2.34)$$

ω = rasio kelembaban (*humidity ratio*)

m_v = massa uap air [kg]

m_{da} = massa udara kering [kg]

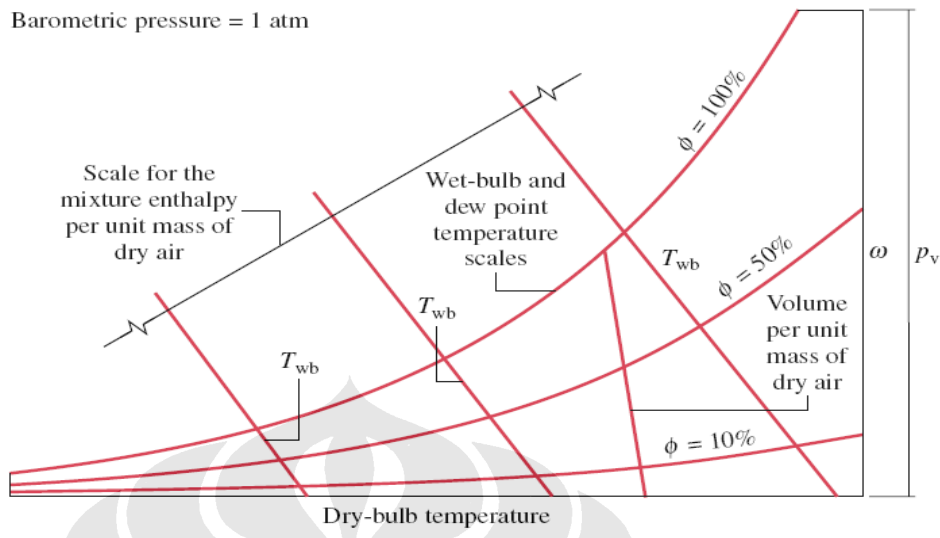
5. **Kelembaban relatif (*Relative humidity*).** Merupakan kebasahan dari atmosfer yang dinyatakan dalam perbandingan antara tekanan parsial uap air udara basah dan tekanan uap air udara lembab yang jenuh pada suhu bola kering yang sama.

$$RH(\phi) = \frac{x_v}{x_{ws}} \quad (2.35)$$

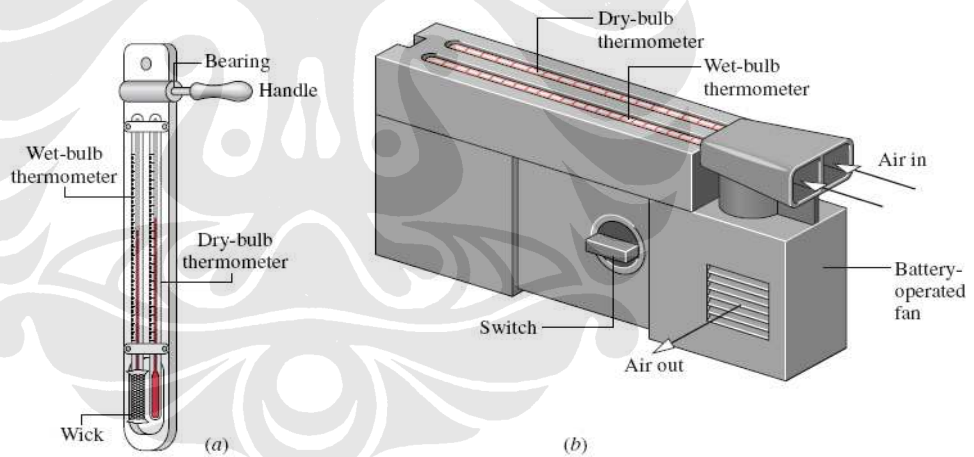
x_{ws} = fraksi mol uap air jenuh pada suhu dan tekanan udara.

x_v = fraksi mole uap air

6. **Temperatur bola kering (*Dry bulb temperature*).** Merupakan temperature udara yang terbaca pada termometer, ketika ia tidak dipengaruhi oleh kelembaban yang ada dalam udara.
7. **Temperatur bola basah (*Wet bulb temperature*).** Merupakan temperature udara yang terbaca pada termometer yang bola pengukur suhunya dibungkus dengan kain basah ketika dialiri kecepatan lebih dari 3-5 m/s.



Gambar 2.3 Skema Pembacaan Psychrometric Chart



Gambar 2.4 Alat Pengukur Dry Bulb dan Wet Bulb

8. **Temperatur pengembunan.** Merupakan temperature dimana bagian uap air yang ada di udara mulai mengembun. Dilihat dari sisi tekanan parsial uap air dalam udara, temperature tersebut adalah suhu jenuh (*saturasi*).

9. **Enthalpy**. Merupakan kalor yang dimiliki oleh udara setiap kg udara kering. Dinyatakan dengan^[4]:

$$h = h_{da} + h_w \quad (2.36)$$

- h = entalpi udara basah [kJ/kg]
 h_{da} = entalpi udara kering [kJ/kg]
 h_w = entalpi uap air [kJ/kg]

2.9 PERPINDAHAN PANAS

2.9.1 Konveksi

Konveksi adalah perpindahan panas karena adanya pergerakan fluida, fluida yang bergerak adalah udara yang dihembuskan melalui blower yang mengalirkan panas dari heater menuju obyek. Persamaan konveksi adalah sebagai berikut^[5]:

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.37)$$

- h = koefisien konveksi [W/m².°C]
 A = luas permukaan [m²]
 T_s = temperatur permukaan [°C]
 T_∞ = temperatur ambien [°C]

2.9.2 Konduksi

Bila suatu benda terdapat perbedaan temperatur dengan panjang x , maka energi (kalor) akan berpindah dari bagian yang bersuhu tinggi kearah bagian yang bersuhu rendah dengan cara konduksi. Laju perpindahan ini berbanding dengan gradien suhu normal.

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x}$$

Jika dimasukan konstanta proporsionalitas maka persamaannya menjadi :

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.38)$$

- q = laju perpindahan kalor [kJ/s]
 k = konduktivitas termal [W/m.°C]

A = luas penampang [m^2]

T = temperatur [$^{\circ}C$]

x = jarak (panjang) perpindahan kalor

Persamaan ini disebut hukum Fourier tentang konduksi kalor (ahli matematika fisika bangsa Prancis, Joseph Fourier)

2.9.3 Radiasi

Radiasi berarti transmisi gelombang, objek atau informasi dari sebuah sumber ke medium atau tujuan sekitarnya. Radiasi termal adalah radiasi elektromagnetik yang dipancarkan suatu benda karena suhu benda tersebut. Rumus radiasi yang digunakan^[6] :

$$\frac{Q}{A} = \alpha \sigma (T_u^4 - T_d^4) \quad (2.39)$$

Q = radiasi

A = luas permukaan [m^2]

α = absorptivitas

σ = konstanta stefant boltzman [$W/m^2 K^4$]

T_u = temperatur sumber radiasi [K]

T_d = temperatur *droplet* [K]

2.10 PERPINDAHAN MASSA

2.10.1 Koefisien perpindahan massa

Koefisien perpindahan massa (*mass transfer coefficient*) dapat kita definisikan seperti halnya dengan koefisien perpindahan-kalor^[7], jadi:

$$m = k_c A (\rho_s - \rho_{\infty}) \quad (2.40)$$

$$k_c = \frac{Sh \cdot D}{d}$$

m = fluks massa difusi komponen A [kg/s]

k_c = koefisien konveksi massa [m/s]

- ρ_s = berat jenis uap pada permukaan [kg/m^3]
- ρ_∞ = berat jenis invinite [kg/m^3]
- Sh = bilangan Sherwood
- D = difusivitas [m^2/s]
- d = diameter dalam lapisan air [m]
- A = luas permukaan yang dibasahi air (πdL) [m^2]

2.10.2 Difusi dalam gas

Gilliland mengusulkan rumus semi empiris untuk koefisien difusi dalam gas^[8]:

$$D_{VAA} = 1.166e-9 \exp \left[1,75 \ln \left(273 + \frac{(T_{in} + T_{out})}{2} \right)^{0.0555} \right] \quad (2.41)$$

Laju difusi molal :

$$N = \frac{\dot{m}}{M}$$

$$N = \frac{-dm/dt}{18.A} \quad (2.42)$$

Dimana $\frac{-dm}{dt} = \rho \frac{-dV}{dt}$

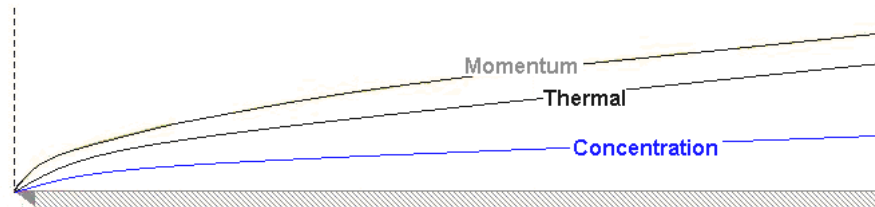
Dan $\frac{-dv}{dt} = Ax \frac{-dr}{dt}$

N = laju difusi molal [mol/s]

M = berat molekul [kg]

m = laju massa aliran (kg/s)

2.11 LAPIS BATAS

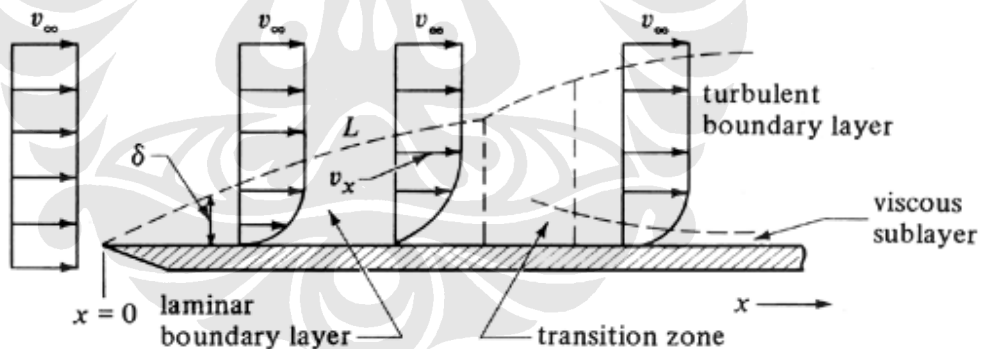


Sumber : McMahan, 2003

Gambar 2.5 Lapisan Batas

Lapis batas (*boundary layer*) merupakan daerah (batasan) dimana masih terdapat gradien yang disebabkan pengaruh viskositas. Lapis batas terbagi menjadi tiga, yaitu lapis batas hidrodinamik, termal dan konsentrasi.

2.11.1 Lapis Batas Hidrodinamik



Sumber : Geankoplis, 2005

Gambar 2.6 Lapis Batas Hidrodinamik

Lapis batas pada plat rata terlihat membentuk suatu lapis batas yang dimulai dari tepi depan, yang dipengaruhi oleh gaya viskos, yang akan semakin meningkat kearah tengah dari plat rata. Gaya viskos ini dapat diterangkan dengan dengan tegangan geser

(*shear stress*) τ antara lapisan-lapisan fluida yang dianggap berbanding dengan gradien kecepatan normal, maka didapat persamaan^[9] :

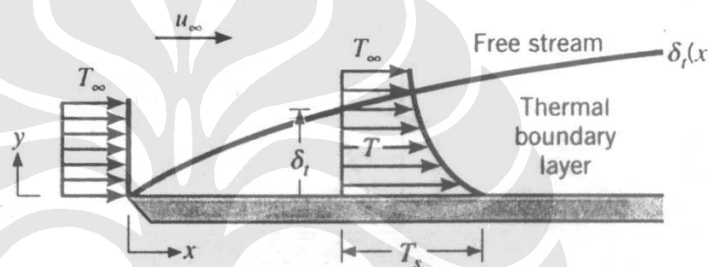
$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.43)$$

τ = tegangan geser [N/m²]

μ = viskositas dinamik [Ns/m²]

u = kecepatan fluida [m/s]

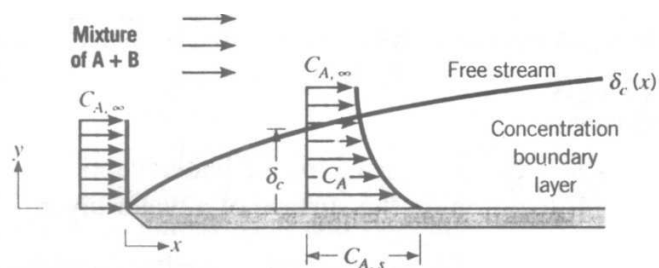
2.11.2 Lapis Batas Thermal



Gambar 2.7 Lapisan Batas Termal

Seperti halnya lapis batas *hidrodinamik*, lapis batas termal didefinisikan sebagai daerah dimana terdapat gradien suhu dalam aliran. Gradien suhu tersebut akibat proses pertukaran kalor antara fluida dan dinding.

2.11.3 Lapis Batas Konsentrasi



Gambar 2.8 Lapis Batas Konsentrasi

Lapis batas konsentrasi terbentuk akibat adanya perbedaan konsentrasi pada zat yang bertumbukan, yang akhirnya menyebabkan perpindahan massa.

2.12 BILANGAN TAK BERDIMENSI

Bilangan tak berdimensi (*dimensionless number*) merupakan suatu parameter yang tak memiliki satuan. Berguna untuk mengetahui kondisi atau karakteristik aliran fluida. Bilangan tak berdimensi bermanfaat pada metode eksperimen suatu sistem yang sama dengan sistem lain namun dalam dimensi yang berbeda seperti pada model pesawat terbang, mobil, kapal laut, dan sebagainya.

Berikut ini adalah beberapa bilangan tak berdimensi yang lazim digunakan pada bidang perpindahan kalor.

2.12.1 Bilangan Reynolds

Diperkenalkan pertama kali oleh Osbourne Reynolds (1842-1912) pada tahun 1883. Merupakan perbandingan atau rasio antara gaya inersia dan gaya viskos dan dipakai untuk menentukan apakah suatu aliran laminar atau turbulen atau transisi, tetapi tekstur permukaan dan sifat fluida yang mengalir juga menentukan aliran fluida. Bentuk persamaan^[10] tersebut adalah :

$$Re = \frac{ux}{\nu} \quad (2.44)$$

u = kecepatan [m/s]

x = jarak [m]

ν = viskositas kinematik [m²/s]

$$Re = \frac{\text{gaya inersia}}{\text{gaya viskos}} = \frac{\rho V^2 / L}{\mu V / L^2} = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (2.45)$$

ρ = massa jenis fluida

V = kecepatan alir fluida

L = panjang karakteristik, berupa diameter pipa

M = viskositas dinamik.

Untuk nilai Re yang kecil, gaya viskos lebih dominan sehingga menciptakan jenis aliran laminar yang stabil, beraturan, dan profil kecepatan konstan. Sementara untuk nilai Re yang besar, timbul aliran turbulen yang fluktuatif, *eddies* acak, dan tak beraturan. Sedangkan aliran transisi merupakan suatu kondisi aliran peralihan yang membentuk laminar dan turbulen sehingga sulit untuk mendapatkan sifat-sifat aliran fluida.

Tabel 2.3 Kondisi Aliran Fluida

Kondisi aliran fluida	Bidang datar (plat)	Dalam pipa
Laminar	$Re < 10^5$	$Re < 2300$
Transisi	$10^5 < Re < 3 \times 10^6$	$2300 < Re < 4000$
Turbulen	$Re > 3 \times 10^6$	$Re > 4000$

Hal lain yang perlu diperhatikan mengenai kondisi fluida terhadap bilangan Reynolds adalah ketebalan lapisan batas. Semakin besar nilai Re , maka tebal lapisan kecepatan δ semakin kecil terhadap permukaan.

2.12.2 Bilangan Prandtl

Ludwig Prandtl mendefinisikan bilangan Prandtl sebagai bilangan tak berdimensi yang merupakan perbandingan antara viskositas kinematik dengan difusivitas termal. Dalam kasus perpindahan kalor, Pr menentukan ketebalan relatif dari lapisan batas *hidrodinamik* dan *thermal boundary layer*.

Persamaannya yaitu :

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.46)$$

ν = viskositas kinematik

α = difusivitas termal

Nilai tipikal dari Pr adalah sebagai berikut :

- 0,7 untuk udara dan gas
- 100 dan 40000 untuk oli mesin
- 4 dan 5 untuk R-12

2.12.3 Bilangan Schmidt

Bilangan Schmidt adalah bilangan tak berdimensi yang merupakan perbandingan antara viskositas kinematik dengan difusivitas massa. Digunakan untuk menentukan karakter aliran fluida bila ada momentum secara simultan dan difusi massa selama proses konveksi.

Persamaannya yaitu :

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (2.47)$$

ν = viskositas kinematik

D = difusivitas massa

2.12.4 Bilangan Nusselt

Bilangan Nusselt merupakan bilangan yang menggambarkan karakteristik proses perpindahan panas^[11]

$$Nu_x = \frac{hx}{k} \quad (2.48)$$

$$Nu_d = 0.023 Re_d^{0.8} Pr^n \quad \text{Untuk aliran berkembang penuh}$$

h = koefisien perpindahan panas [W/(m² C)]

k = konduktivitas panas udara [W/(m C)]

2.12.5 Bilangan Sherwood

Bilangan Sherwood merupakan bilangan yang menggambarkan gradien konsentrasi yang terjadi pada permukaan^[12].

$$Sh = \frac{k_c \cdot L}{D_{AB}} \quad (2.49)$$

2.12.6 Bilangan Lewis

Bilangan Lewis merupakan perbandingan antara difusivitas termal dan difusivitas massa, bermanfaat untuk menentukan karakteristik aliran fluida dimana terjadi perpindahan kalor dan perpindahan massa secara simultan yang disebabkan oleh konveksi.

$$Le = \frac{\alpha}{D_{AB}} \quad (2.50)$$

$$Le = \frac{Sc}{Pr} \quad (2.51)$$

2.13 PERSAMAAN RANZ-MARSHALL

Persamaan Ranz-Marshall diperkenalkan pertama kali oleh Ranz W E & Marshall W R, Jr. pada tahun 1953, merupakan analogi (hubungan) perpindahan massa dengan perpindahan kalor. Analogi ini mempunyai persyaratan bilangan Lewis

$Le \left(\frac{Sc}{Pr} \right)$ bernilai satu^[13] dan nilai $Re \leq 200$. Berikut adalah pers. Ranz-Marshall :

$$Nu = 2 + 0,6 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (2.52)$$

Sehingga dengan analogi untuk perpindahan massa berlaku :

$$Sh = 2 + 0,6 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (2.53)$$

Kedua persamaan ini akan digunakan sebagai dasar dalam menyelesaikan perhitungan untuk melakukan pengolahan data dan proses analisa untuk keempat metode perhitungan perpindahan massa dan perpindahan panasnya seperti yang telah disebutkan pada bagian tujuan dari penelitian ini yakni rumus model umum, *stagnant film model* dan pendekatan baru pada *stagnant film model* (E. A. Kosasih, 2006) serta pendekatan secara eksperimental.