



UNIVERSITAS INDONESIA

**LAJU PENGUAPAN TETESAN LARUTAN GARAM 5% DAN
0% DALAM AIR**

SKRIPSI

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

DUDI RUSDIANA
07 06 19 8461

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JULI 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : DUDI RUSDIANA

NPM : 0706198461

Tanda Tangan :

Tanggal : 7 Juli 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Dudi Rusdiana
NPM : 0706198461
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : **LAJU PENGUAPAN TETESAN LARUTAN
GARAM 5 % DAN 0% DALAM AIR**

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

Penguji : **Dr.Ing.Ir.Nasruddin, M.Eng.** (.....)

Penguji : **Dr.Ir. Warjito, M.Eng.** (.....)

Penguji : **Ir.Imansyah Ibnu Hakim, M.Eng.** (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 7 Juli 2009

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, 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 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, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

Dr. Ir. Engkos A.Kosasih, M.T.

Selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.

Harapan penulis kiranya skripsi ini dapat memberikan pengetahuan yang bermanfaat bagi penulis khususnya dan pembaca pada umumnya. Semoga Allah SWT senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah pada kita semua. Amin.

Depok, 7 Juli 2009

Penulis

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

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

Nama : Dudi Rusdiana
NPM : : 0706198461
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

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 :

**”LAJU PENGUAPAN TETESAN LARUTAN GARAM 5% DAN 0%
DALAM AIR”**

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 mempublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari 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 : 7 Juli 2009

Yang menyatakan

(Dudi Rusdiana)

ABSTRAK

Nama : Dudi Rusdiana
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : **LAJU PENGUAPAN TETESAN LARUTAN GARAM 5% DAN 0% DALAM AIR.**

Pengetahuan tentang laju penguapan yang terlibat dalam kegiatan pengeringan makanan, pembakaran bahan bakar cair evaporative cooling, dan spray drying sangat diperlukan supaya prosesnya dapat berjalan efektif dan efisien. Untuk itu diperlukan sifat-sifat mengenai laju penguapan air yang terkandung didalamnya dan pengaruh beberapa temperatur, laju aliran, konsentrasi, serta kelembaban terhadap laju penguapan tersebut.

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan nosel yang berisi cairan untuk menghasilkan tetesan, pemanas, penghembus udara, alat kontrol, dehumidifier, dan tabung pyrex. Tetesan yang terbentuk pada wire probe termokopel kemudian dialiri udara dengan temperatur dan laju aliran yang bervariasi. Lensa makro Nikon D40 digunakan untuk mencitrakan gambar perubahan dimensi tetesan terhadap waktu.

Setelah dianalisa akan didapatkan korelasi dari bilangan Reynolds (Re), Prandtl (Pr), Schmidt (Sc), Nusselt (Nu), dan Sherwood (Sh) sehingga dapat diketahui korelasi antara data pengujian yang menggunakan model stagnan film dan pendekatan baru pada model stagnan film (E. A. Kosasih, 2006) terhadap analogi Ranz-Marshall.

Kata Kunci : Penguapan tetesan; Bilangan : Reynolds (Re), Prandtl (Pr), Schmidt (Sc), Nusselt (Nu), dan Sherwood (Sh); Model stagnan film; Pendekatan model baru (E. A. Kosasih, 2006).

ABSTRACT

Nama : Dudi Rusdiana
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : **EVAPORATION FLOW OF SALT SOLUTION
DROP 5% AND 0% IN WATER.**

Knowledge about droplet evaporation as integral part in drying food activities, combustion of liquid fuel, evaporative cooling, and spray drying is very necessary in order that activities can proceed effectively and efficiently. For that reason, it is very important to understand the characteristics about droplet evaporation and influenced by variation of temperature, flow velocity, concentration, and humidity.

This research uses nozzle contained liquid to produce a droplet, heater, blower, control device, dehumidifier, and pyrex. A droplet that produced by injection then flowed by hot air with the variation of temperature and flow velocity. By using macro lens of Nikon D40, the changes of diameter droplet per time can be recorded.

With analyzing data, this research can gain the relationship of Reynolds (Re), Prandtl (Pr), Schmidt (Sc), Nusselt (Nu), Sherwood (Sh) numbers and also gain the correlation between stagnant film model, new model of stagnant film, and Ranz-Marshall analogy.

Keywords : *Droplet Evaporation*; Numbers: Reynold (Re), Prandtl (Pr), Schmidt (Sc), Nusselt (Nu), and Sherwood (Sh); stagnant film model; The new model (E. A. Kosasih).

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
DAFTAR NOTASI.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Metodologi Penelitian.....	3
1.5 Sistematika Penulisan	4
BAB II DASAR TEORI.....	5
2.1 Larutan Garam	5
2.2 Prinsip Dasar Pengeringan.....	6
2.3 Lapisan Batas.....	8
2.3.1 Lapis Batas Hidrodinamik.....	8
2.3.2 Lapis Batas <i>Thermal</i>	9
2.3.3 Lapis Batas Konsentrasi.....	9
2.4 Bilangan Tak Berdimensi	9
2.4.1 Bilangan Reynolds	10
2.4.2 Bilangan Prandtl.....	11
2.4.3 Bilangan Schmidt.....	11
2.4.4 Bilangan Nusselt	12
2.4.5 Bilangan Sherwood.....	12
2.4.6 Bilangan Lewis	12
2.5 Perasamaan Ranz-Marshall.....	12
2.6 Model Analogi Stagnan Film.....	13
2.6.1 Bilangan Nusselt model analogi stagnan film.....	13

2.6.2 Sherwood Model Stagnan Film	14
2.7 Model Analogi Pendekatan Baru Stagnan Film.....	14
2.7.1 Sherwood Model Pendekatan Baru.....	15
2.7.2 Bilangan Nusselt Model Pendekatan Baru.....	16
2.8 Karakteristik Udara	17
2.9 Thermodinamika Udara Basah.....	17
2.10 Kelembaban	18
2.10.1 Kelembaban Relatif.....	18
2.10.2 Rasio Kelembaban	19
2.11 Psychrometric Chart.....	21
2.12 Perpindahan Panas	23
2.12.1 Konveksi	23
2.12.2 Konduksi	23
2.12.3 Radiasi.....	24
2.12.4 Fluks perpindahan panas	24
2.12.5 Laju perpindahan panas.....	25
2.13 Perpindahan Massa	25
2.13.1 Koefisien Perpindahan Massa.....	25
2.13.2 Difusi Dalam Gas	25
2.13.3 Fluks Perpindahan Massa.....	26
2.13.4 Laju Perpindahan Massa	26
2.14 Termokopel	26
2.14.1 Prinsip Termokopel.....	27
BAB III METODE PENELITIAN	31
3.1 Komponen Sistem	31
3.1.1 Blower.....	31
3.1.2 Air Conditioner	31
3.1.3 Tabung Dehumidifier	32
3.1.4 Heater	33
3.1.5 Pyrex	33
3.1.6 Digital controller	34
3.1.7 Temperature display.....	35
3.1.8 Nosel	35
3.1.9 Inverter	36
3.2 Prinsip Alat Pengujian.....	37
3.3 Prosedur Kalibrasi dan Pengambilan Data.....	37

3.3.1 Kalibrasi Kecepatan	37
3.3.2 Pengambilan Data Foto	38
3.3.3 Pengolahan Foto	40
3.4 Pengolahan Data.....	41
BAB IV ANALISA DATA.....	55
4.1 Analisa Grafik	55
4.2 Analisa Grafik Perbandingan Antar Model	55
4.2.1 Grafik Sherwood	55
4.2.2 Grafik Nusselt	57
4.3 Analisa Grafik Perbandingan Kelembaban.....	60
4.3.1 Grafik Sherwood	60
4.3.2 Grafik Nusselt	61
4.4 Analisa Perbandingan Pengaruh Konsentrasi	62
4.4.1 Grafik Sherwood	62
4.4.2 Grafik Nusselt	63
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	64
5.1 Kesimpulan	64
5.2 Saran.....	64
DAFTAR ACUAN.....	65
DAFTAR PUSTAKA	67
LAMPIRAN.....	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Lapisan Batas.....	8
Gambar 2.2 Lapisan Batas Hidrodinamik	8
Gambar 2.3 Lapisan Batas Thermal	9
Gambar 2.4 Lapisan Batas Konsentrasi	9
Gambar 2.5 Model Film Stagnan	13
Gambar 2.6 Skema Pembacaan Psychrometric Chart	22
Gambar 2.7 Alat Pengukur Dry Bulb dan Wet Bulb.....	22
Gambar 3.1 <i>Blower</i>	31
Gambar 3.2 Air Conditioner Dan Controller-nya.....	31
Gambar 3.3 Tabung Dehumidifier.....	32
Gambar 3.4 <i>Heater</i>	33
Gambar 3.5 <i>Pyrex</i>	33
Gambar 3.6 <i>Digital controller</i>	34
Gambar 3.7 Skema <i>Auto Tuning</i>	35
Gambar 3.8 <i>Temperature display</i>	35
Gambar 3.9 Nosel.....	36
Gambar 3.10 Display <i>Inverter SJ200</i>	36
Gambar 3.11 Skema pengujian.....	37
Gambar 3.12 Posisi jarum dan tetesan.....	39
Gambar 3.13 Panel sistem listrik.....	39
Gambar 3.14 Tetesan.....	40
Gambar 3.15 Skema aliran udara	44
Gambar 3.16 Psikometri non AC	45
Gambar 3.17 Psikometri AC	46

Gambar 4.1 Grafik Sherwood non ac garam 5%	55
Gambar 4.2 Grafik Sherwood ac garam 5%.....	56
Gambar 4.3 Grafik Sherwood non ac aquades.....	56
Gambar 4.4 Grafik Sherwood ac aquades	57
Gambar 4.5 Grafik Nusselt non ac garam 5%	57
Gambar 4.6 Grafik Nusselt untuk ac garam 5%	58
Gambar 4.7 Grafik Nusselt non ac aquades.	58
Gambar 4.8 Grafik Nusselt ac aquades.....	59
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Sh Aquades pada kondisi AC vs Non AC	60
Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Sh Garam pada kondisi AC vs Non AC.....	60
<u>Gambar 4.11</u> Grafik Perbandingan Nu Aquades pada kondisi AC vs Non AC.....	61
<u>Gambar 4.12</u> Grafik Perbandingan Nu Garam 5% pada kondisi AC vs Non AC.....	61
<u>Gambar 4.13</u> Grafik Sh Perbandingan Konsentrasi antara Aquades AC vs Garam 5 % AC	62
Gambar 4.14 Grafik Sh Perbandingan Konsentrasi antara Aquades non AC vs Garam 5 % non AC	62
Gambar 4.15 Grafik Nu Perbandingan Konsentrasi antara Aquades AC vs Garam 5 % AC	63
Gambar 4.16 Grafik Nu Perbandingan Konsentrasi antara Aquades AC vs Garam 5 % AC	63

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 PSYCHROMETRIC CHART.....	69
Lampiran 2 TABEL SIFAT UDARA PADA TEKANAN ATMOSFER.....	70
Lampiran 3 TABEL EMISSIVITAS PERMUKAAN	71
Lampiran 4 TABEL SIFAT AIR JENUH 1	72
Lampiran 5 TABEL SIFAT AIR JENUH 2	73
Lampiran 6 HASIL KALKULASI DATA GARAM 5% NON AC	74
Lampiran 7 HASIL KALKULASI DATA GARAM 5% AC	79
Lampiran 8 HASIL KALKULASI DATA AQUADES AC	83
Lampiran 9 HASIL KALKULASI DATA AQUADES NON AC	88



DAFTAR NOTASI

Simbol	Keterangan	Dimensi
A	luas penampang tetesan	$[m^2]$
C	konsentrasi total A dan B / udara	$[kmole/m^3]$
C_{pA}	panas jenis molal udara	$[J/(kmole K)]$
c_p	panas jenis udara	$[J/(kgK)]$
d	diameter tetesan	$[m]$
D_{AB}	difusivitas massa	$[m^2/s]$
h	koefisien konveksi	$[J/(m^2K)]$
h_{fg}	kalor laten penguapan air pada T_{WB}	$[J/kg]$
h_L	koefisien konveksi pada laju aliran rendah	$[W/(m^2K)]$
k	konduktivitas campuran	$[W/(mK)]$
k_c	koefisien perpindahan massa	$[kmole/(m^2s)]$
k_{cL}	koef. perpindahan massa pada laju perp. rendah	$[kmole/(m^2s)]$
Le	bilangan lewis	
Nu	bilangan Nusselt	
N_{A0}	laju perpindahan massa	$[kmole/(m^2s)]$
Pr	bilangan Prandtl	
ρ	Massa jenis	$[kg/m^3]$
q	laju perpindahan panas	$[W/m^2]$
q_0	laju perpindahan panas pada permukaan tetesan	$[W/m^2]$
Re	bilangan Reynold	
Sc	bilangan Schmidt	
Sh	bilangan Sherwood	
T_0	temperatur tetesan	$[K]$
T_∞	temperatur aliran bebas	$[K]$
g	Percepatan gravitasi	$[m/s^2]$
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	[K]
m_{da}	Massa udara kering	[kg]
m_v	Massa uap air	[kg]
n	Mole udara basah	[Kmole]
n_{da}	Mole udara kering	[Kmole]
n_v	Mole uap air	[Kmole]
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_x	fluks perpindahan massa	
R_T	fuks perpindahan panas	
R_{da}	Tetapan gas untuk udara kering = 287	[J/kg.K]
R_v	Tetapan gas untuk uap air = 461,5	[J/kg.K]
X_0	fraksi mol di permukaan tetesan	[kmole/m ³]
X_∞	fraksi mol dalam aliran bebas	[kmole/m ³]
σ	Konstanta stefant boltzman	[W/m ² K ⁴]
$Q_{konveksi}$	Radiasi	[Watt]
ρ_s	Berat jenis uap pada permukaan	[kg/m ³]
ρ_∞	Berat jenis invinite	[kg/m ³]
μ	Viskositas dinamik	[Ns/m ²]
u	Kecepatan fluida	[m/s]

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses pengeringan makanan sangat dibutuhkan pada industri pengolahan makanan. Proses pengeringan adalah proses untuk mengurangi kadar air yang terkandung pada bahan makanan. Proses ini sangat mempengaruhi kualitas dari bahan makanan dimana makanan yang diproduksi industri harus bisa bertahan lama dalam suatu jangka waktu tertentu. Pada awalnya proses pengeringan hanya menggunakan metode alamiah yaitu memanfaatkan panas sinar matahari. Metode ini memiliki beberapa keterbatasan, yaitu proses pengeringan hanya bisa dilakukan pada siang hari dan dilakukan pada cuaca cerah sepanjang hari. Selain itu seiring dengan perubahan iklim yang kini semakin tidak menentu maka proses pengeringan dengan sinar matahari tidak dapat lagi diharapkan. Hal ini mendorong diperlukannya pengembangan teknologi pada proses pengeringan. Prinsip dari proses pengeringan itu adalah terjadinya penguapan air dari bahan ke udara sekitarnya karena adanya perbedaan kandungan air yang terdapat dalam bahan dan udara. Selama pengeringan terdapat 2 proses yang berjalan simultan, yaitu :

1. Adanya perpindahan panas dari udara ke dalam bahan sehingga air yang ada pada bahan mengalami perubahan menjadi fase uap.
2. Adanya perpindahan massa uap air dari permukaan bahan ke udara pengering sekitarnya.

Selama 25 tahun belakangan ini, telah banyak dilakukan penelitian pada proses pengeringan. Salah satu metode yang digunakan adalah penguapan tetesan (*droplet evaporation*). Penguapan tetesan (*droplet evaporation*) adalah salah satu cara yang dapat dipergunakan untuk kebutuhan tersebut. Agar dapat membuat mesin pengering untuk pengawetan makanan yang efektif dan efisien, maka diperlukan penelitian untuk karakteristik laju penguapan air pada zat makanan dan minuman. Dengan memvariasikan temperatur, kecepatan aliran, dan kelembaban untuk keperluan penelitian maka diperlukan alat uji penguapan tetesan. Salah satu peneliti yang telah melakukan studi ekperimental penguapan tetesan adalah Ranz

W E & Marshall W R, Jr. yang menyimpulkan bahwa proses penguapan tetesan merupakan analogi antara perpindahan kalor dan perpindahan massa. Inti dari analogi ini adalah memanfaatkan hubungan similaritas antara bilangan Sherwood dan bilangan Nusselt, sehingga solusi perpindahan kalor aplikatif terhadap perpindahan massa.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah membandingkan data hasil pengujian yang kami lakukan dengan persamaan analogi Ranz-Marshall pada pengujian tetesan dengan menggunakan metode perpindahan panas (*heat transfer*) dan perpindahan massa (*mass transfer*) pada penguapan tetesan (*droplet evaporation*). Pengujian ini dilakukan pada beberapa variasi kecepatan aliran, temperatur aliran, dan kelembaban agar mendapatkan hasil yang beragam. Pada penelitian kali ini dilakukan penambahan *Dehumidifier* dan *Air Conditioner* untuk menurunkan kelembaban udaranya. Untuk membantu analisa mengenai perpindahan panas (*heat transfer*) dan perpindahan massa (*mass transfer*) akan digunakan metode perhitungan berupa *stagnant film model*, pendekatan baru pada *stagnant film model* (E. A. Kosasih, 2006), dan analogi Ranz-Marshall. Disamping untuk melakukan analisa, diharapkan dari perhitungan metode ini didapatkan korelasi yang terdekat dengan nilai eksperimen dengan cara mem-validasi ketiga metode yakni rumus model umum, *stagnant film model* dan pendekatan baru pada *stagnant film model* (E. A. Kosasih, 2006) dengan data perhitungan eksperimen.

1.3 Batasan Masalah

Dalam mendapatkan karakteristik laju penguapan tersebut, batasan masalah yang diambil adalah sebagai berikut:

1. Fluida cair yang dipakai adalah garam dengan kadar 5% dan 0% (aquades).
2. Asumsi tetesan (*droplet*) yang terbentuk adalah berbentuk bola.
3. Diameter tetesan (*droplet*) yang digunakan berada pada nilai 1,8 mm sampai pada 2,4 mm.
4. Variasi temperaturnya berkisar pada 50 °C, 75 °C, 100 °C, 150 °C.

5. Variasi dari kecepatan aliran berkisar antara frekuensi 7 Hz, 10 Hz, dan 15 Hz pada inverter.
6. Variasi kelembaban udara yaitu ac dan non ac.

1.4 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Metode ini meliputi pencarian data-data literatur seperti buku referensi, tugas akhir, jurnal, artikel, dan data download dari internet yang berkaitan dengan laju penguapan tetesan. Data-data yang telah diperoleh harus disusun dan dikelola dengan baik agar dapat membantu proses analisa sehingga didapatkan karakteristik laju penguapan.

2. Modifikasi alat pengujian.

Mengganti beberapa komponen alat pengujian agar dapat dipergunakan sesuai dengan tuntutan pengujian yang membutuhkan beberapa variasi dalam pengujiannya.

3. Pengambilan data

Proses pengambilan data laju penguapan yaitu dengan pengambilan gambar tetesan dari waktu ke waktu sehingga dapat diketahui pengurangan diameter tetesan (*droplet*). Pengambilan data gambar divariasikan terhadap temperatur, kecepatan aliran, dan kelembaban udara. Data ini akan berguna untuk menganalisa dengan menggunakan metode perpindahan panas (*heat transfer*) dan perpindahan massa (*mass transfer*) penguapan tetesan (*droplet evaporation*) yang akan dikorelasikan dengan perhitungan berupa rumus umum empiris, *stagnant film model* dan pendekatan baru pada *stagnant film model* (E. A. Kosasih, 2006) serta pendekatan secara eksperimental.

4. Pencitraan tetesan

Pencitraan gambar tetesan dilakukan agar dapat diketahui kecepatan penguapan tetesan (*droplet*). Besaran nilai kecepatan penguapan tetesan diperoleh dari perubahan diameter tetesan terhadap satuan waktu.

Pencitraan gambar tetesan dilakukan di pyrex dan menggunakan kamera Nikon D40 dengan lensa makro.

5. Penyusunan Laporan

Data yang sudah didapatkan harus tersusun dengan sistematis karena banyak variasi yang akan digunakan dalam pengujian sehingga akan banyak juga data yang dihasilkan. Dengan susunan yang sistematis tersebut diharapkan akan memudahkan dalam melakukan perhitungan dan analisa laporan.

1.5 Sistematika Penulisan

Dalam penulisan penelitian ini, penulis membagi dalam lima bab dan beberapa subbab dengan tujuan agar laporan penulisan menjadi lebih terstruktur dan terarah. Sistematika penulisannya adalah sebagai berikut :

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini membahas tentang latar belakang, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi penelitian dan sistematika penulisan.

BAB 2 DASAR TEORI

Bab ini membahas tentang konsep-konsep dasar mengenai penelitian dan konsep-konsep dasar untuk perhitungan dan analisisnya.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Bab ini membahas mengenai prosedur pengambilan data, kalibrasi alat, pencitraan tetesan, dan langkah-langkah perhitungan.

BAB 4 ANALISA DATA

Bab ini membahas mengenai grafik-grafik dari hasil perhitungan data sesuai dengan variasi pengujian yang sudah disebutkan sebelumnya dan juga menyajikan analisa terhadap hasil yang terjadi.

BAB 5 KESIMPULAN

Bab ini membahas tentang kesimpulan terhadap semua hasil penelitian sesuai dengan tujuan dari penelitian ini.

BAB II DASAR TEORI

2.1 Larutan Garam

Dalam ilmu kimia, garam adalah senyawa ionik yang terdiri dari ion positif (kation) dan ion negatif (anion), sehingga membentuk senyawa netral (tanpa bermuatan). Larutan garam dalam air merupakan larutan elektrolit, yaitu larutan yang dapat menghantarkan arus listrik. Larutan merupakan fase yang setiap hari ada di sekitar kita. Suatu sistem homogen yang mengandung dua atau lebih zat yang masing-masing komponennya tidak bisa dibedakan secara fisik. Komponen dari larutan terdiri dari dua jenis yaitu pelarut dan zat terlarut, yang dapat dipertukarkan tergantung jumlahnya. Pelarut merupakan komponen utama yang terdapat dalam jumlah yang banyak, sedangkan komponen minornya merupakan zat terlarut. Larutan terbentuk melalui pencampuran dua atau lebih zat murni yang molekulnya berinteraksi langsung dalam keadaan tercampur.

Berdasarkan kemampuan menghantarkan arus listrik (didasarkan pada daya ionisasi), larutan dibagi menjadi dua yaitu larutan elektrolit yang terdiri dari elektrolit kuat dan elektrolit lemah serta larutan non elektrolit. Larutan elektrolit adalah larutan yang dapat menghantarkan arus listrik, sedangkan larutan non elektrolit adalah larutan yang tidak dapat menghantarkan arus listrik. Larutan elektrolit kuat adalah larutan yang mempunyai daya hantar arus listrik, karena zat terlarut yang berada didalam pelarut (biasanya air), seluruhnya dapat berubah menjadi ion-ion dengan harga derajat ionisasi adalah satu ($\alpha = 1$). Yang tergolong elektrolit kuat adalah :

1. asam kuat ,antara lain : HCl, HClO₃, HClO₄, H₂SO₄, HNO₃ dan lain-lain.
2. basa kuat, yaitu basa-basa golongan alkali dan alkali tanah, antara lain : NaOH, KOH, Ca(OH)₂, Mg(OH)₂, Ba(OH)₂ dan lain-lain.
3. garam-garam yang mempunyai kelarutan tinggi, antara lain : NaCl, KCl, Al₂(SO₄)₃, dan lain-lain.

Larutan elektrolit lemah adalah larutan yang mampu menghantarkan arus listrik dengan daya yang lemah, dengan harga derajat ionisasi lebih dari nol tetapi kurang dari satu ($0 < \alpha < 1$). Yang tergolong elektrolit lemah adalah :

1. asam lemah, antara lain : CH_3COOH , HCN , H_2CO_3 , H_2S , dan lain-lain.
2. basa lemah, antara lain : NH_4OH , $\text{Ni}(\text{OH})_2$ dan lain-lain.
3. garam-garam yang sukar larut, antara lain : AgCl , CaCrO_4 , PbI_2 .

Larutan non elektrolit adalah larutan yang tidak dapat menghantarkan arus listrik, hal ini disebabkan karena larutan tidak dapat menghasilkan ion-ion (tidak meng-ion). Yang termasuk larutan non elektrolit antara lain : larutan urea, larutan sukrosa, larutan glukosa, larutan alkohol, dan lain-lain.

Reaksi kimia untuk menghasilkan garam antara lain :

Asam + Basa \rightarrow Garam + Air

Asam klorida + Natrium hidroksida \rightarrow Natrium klorida + air

$\text{HCl}(\text{aq}) + \text{Na OH}(\text{aq}) \rightarrow \text{Na Cl}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$

Untuk ionisasi larutan garam dapur : $\text{NaCl}_{(\text{aq})} \rightarrow \text{Na}^{+(\text{aq})} + \text{Cl}^{-(\text{aq})}$ (2.1)

Dari persamaan (2.1) terlihat bahwa garam dapur terurai menjadi 2 ion yaitu Na^+ dan Cl^- maka konsentrasi partikelnya menjadi 2 kali semula. Yang menjadi ukuran langsung dari keadaan (kemampuannya) untuk mengion adalah derajat ionisasi.

2.2 Prinsip Dasar Pengeringan

Pengeringan adalah suatu proses kompleks yang bertujuan untuk mengurangi kandungan air dalam bahan sampai batas tertentu. Proses pengeringan meliputi perpindahan panas dan massa secara transien 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.

Prinsip dasar proses pengeringan adalah penguapan air dari bahan ke udara sekeliling karena adanya perbedaan kandungan air antara bahan dan udara. Selama pengeringan terjadi dua proses yang berjalan simultan (Pramudono, 1988), yakni :

1. Adanya perpindahan panas dari udara ke dalam bahan sehingga air yang ada pada bahan mengalami perubahan menjadi fase uap.

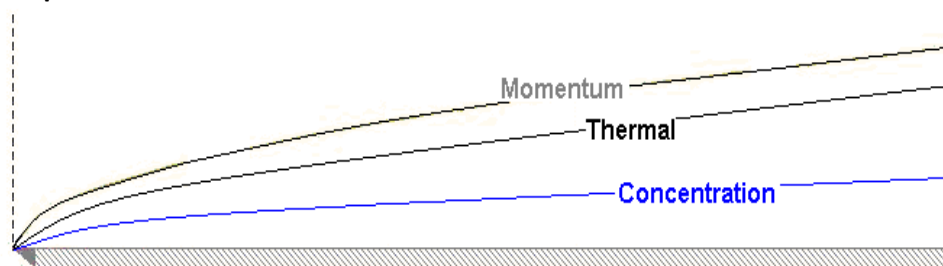
2. Adanya perpindahan massa uap air dari permukaan bahan ke udara pengering sekelilingnya.

Pengeringan terjadi melalui penguapan uap air dengan adanya pemberian panas ke sampel uji. Panas dapat diberikan melalui konveksi (pengering langsung), konduksi (pengering sentuh atau tak langsung), radiasi atau secara volumetris dengan menempatkan sampel 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.

2.3 Lapisan Batas

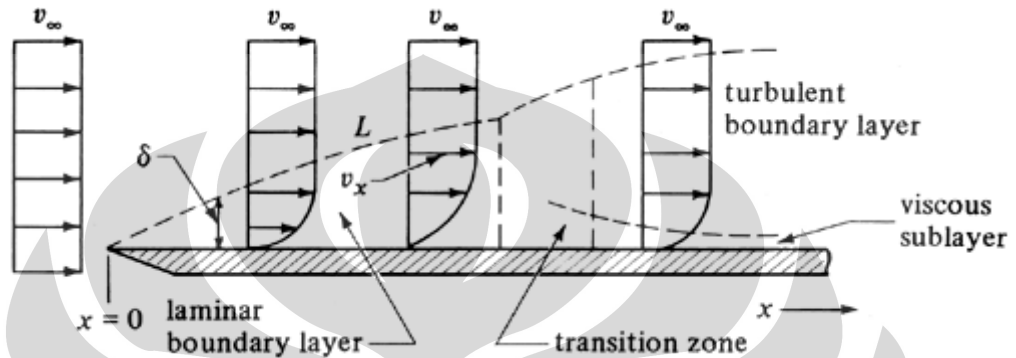


Gambar 2.1 Lapisan Batas

(Sumber : Niall McMahon, The Mechanics of Drug Dissolution - An adventure in fluid mechanics, Dublin)

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

2.3.1 Lapisan Batas Hidrodinamik



Gambar 2.2 Lapisan Batas Hidrodinamik

(Sumber : Christie J Geankoplis, Principles of Momentum Transfer and Applications, Indiana)

Lapisan batas pada plat rata terlihat membentuk suatu lapisan yang dimulai dari tepi depan, yang dipengaruhi oleh gaya viskos, yang akan semakin meningkat ke arah tengah dari plat rata. Gaya viskos ini dapat diterangkan dengan tegangan geser (*shear stress*) τ antara lapisan-lapisan fluida yang dianggap berbanding dengan gradien kecepatan normal, maka didapat persamaan^[1] :

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.2)$$

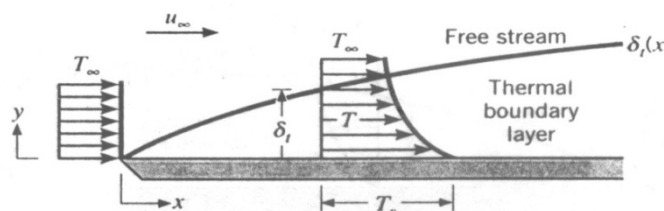
τ = tegangan geser [N/m²]

μ = viskositas dinamik [Ns/m²]

u = kecepatan fluida [m/s]

2.3.2 Lapis Batas Thermal

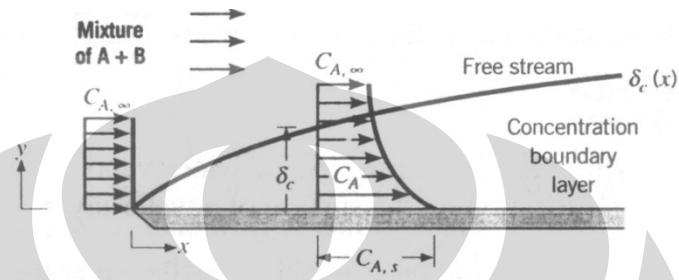
Seperti halnya lapisan batas *hidrodinamik*, lapisan batas termal didefinisikan sebagai daerah dimana terdapat gradien suhu dalam aliran. Gradien suhu tersebut akibat proses pertukaran kalor antara fluida dan dinding.



Gambar 2.3 Lapisan Batas Thermal

(Sumber : Christie J Geankoplis, Principles of Momentum Transfer and Applications, Indiana)

2.3.3 Lapis Batas Konsentrasi



Gambar 2.4 Lapisan Batas Konsentrasi

(Sumber : Christie J Geankoplis, Principles of Momentum Transfer and Applications, Indiana)

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

2.4 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.

2.4.1 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^[2] tersebut adalah :

$$Re = \frac{ux}{\nu} \quad (2.3)$$

u = kecepatan [m/s]

x = jarak [m]

ν = viskositas kinematik [m²/s]

$$Re = \frac{\text{gaya inersia}}{\text{gaya viskos}} = \frac{\rho V^2 / L}{\mu V / L^2} = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (2.4)$$

ρ = massa jenis fluida [kg/m³]

V = kecepatan alir fluida [m/s]

L = panjang karakteristik, berupa diameter pipa [m]

μ = viskositas dinamik [kg/m.s]

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.

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	$Re > 3 \times 10^6$	$Re > 4000$

Tabel 2.1 Kondisi Aliran Fluida

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.

2.4.2 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 hidro dinamik dan termal *boundary layer*.

Persamaannya yaitu :

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.5)$$

ν = viskositas kinematik [m^2/s]

α = difusivitas termal [m^2/s]

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

2.4.3 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 :

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (2.6)$$

ν = viskositas kinematik [m^2/s]

D = difusivitas massa [m^2/s]

2.4.4 Bilangan Nusselt

Bilangan Nusselt merupakan bilangan yang menggambarkan karakteristik proses perpindahan panas^[3].

$$Nu_x = \frac{hx}{k} \quad (2.7)$$

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

h = koefisien perpindahan panas [$W/(m^2 C)$]

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

2.4.5 Bilangan Sherwood

Bilangan Sherwood merupakan bilangan yang menggambarkan gradien konsentrasi yang terjadi pada permukaan^[4].

$$Sh = \frac{k_c \cdot L}{D_{AB}} \quad (2.8)$$

2.4.6 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.

$$Le = \frac{\alpha}{D_{AB}} \quad (2.9)$$

$$Le = \frac{Sc}{Pr} \quad (2.10)$$

2.5 Persamaan Ranz-Marshall

Pers. 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^[5] dan nilai $Re \leq 200$. Berikut adalah pers. Ranz-Marshall :

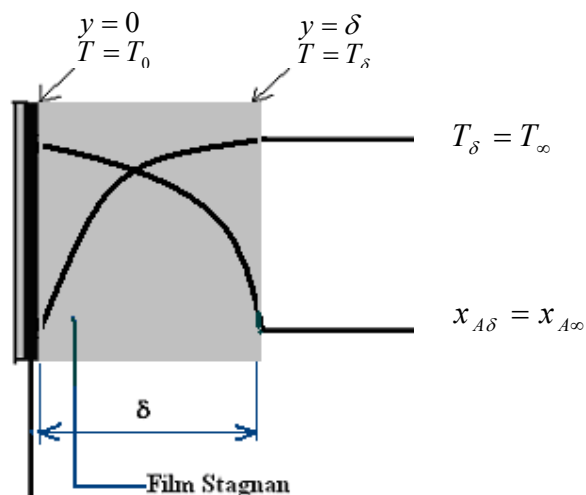
$$Nu = 2 + 0,55 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (2.11)$$

Sehingga dengan analogi untuk perpindahan massa berlaku :

$$Sh = 2 + 0,55 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (2.12)$$

2.6 Model Analogi Stagnan Film

Model analitis ini diturunkan untuk perpindahan panas dan massa yang tinggi disekitar plat datar (koordinat Cartesius). Walaupun demikian model ini digunakan pula untuk menghitung perpindahan disekitar bola sferik.



Gambar 2.5 Model Film Stagnan

Pada gambar memperlihatkan lapisan cairan dingin yang menguap disekitar udara panas. Film stagnan adalah film khayal yang diasumsikan bahwa di luar film tersebut tidak terdapat beda potensial perpindahan^[6].

2.6.1 Bilangan Nusselt model analogi stagnan film

$$Nu_{StF} = \frac{h_{L_StF} \times d}{k} \quad (2.13)$$

$$h_{L_StF} = \frac{h}{\theta_{T_StF}} \quad (2.14)$$

$$\theta_{T_StF} = \frac{h}{h_L} \quad (2.15)$$

$$\theta_{T_StF} = \frac{\ln(1 + R_T)}{R_T} \quad (2.16)$$

Nu_{StF} = bilangan nusselt stagnan film

h_{L_StF} = koefisien perpindahan panas menuju nol [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]

d = diameter droplet [m]

k = konduktivitas panas udara [$W/m \cdot ^\circ C$]

h = koefisien perpindahan panas [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]

θ_{T_StF} = faktor koreksi perpindahan panas

R_T = fluks perpindahan panas

2.6.2 Sherwood model stagnan film (Sh_{StF})

$$Sh_{StF} = \frac{k_{cL_StF} \times diameter}{D_{AB}} \quad (2.17)$$

$$k_{cL_StF} = \frac{k_c}{\theta_{StF}} \quad (2.18)$$

$$\theta_{X_StF} = \frac{k_c}{k_{cL}} \quad (2.19)$$

$$\theta_{X_StF} = \frac{\ln(1 + R_x)}{R_x} \quad (2.20)$$

Sh_{StF} = bilangan *sherwood* stagnan film

k_{cL_StF} = koefisien perpindahan massa menuju nol [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]

d = diameter droplet [m]

D_{AB} = Difusivitas massa [m^2/s]

kc = koefisien perpindahan massa [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]

θ_{X_StF} = faktor koreksi perpindahan massa

R_X = fluks perpindahan massa

2.7 Model Analogi Pendekatan Baru Stagnan Film

Konfirmasi analogi perpindahan panas dan massa (Ranz-Marshall) menunjukkan hasil yang negatif dan hal ini sesuai dengan hasil simulasi yang dilakukan oleh Chen et. al. (2002). Korelasi yang lemah untuk bilangan Nusselt dan bilangan Sherwood pada data Walton (2004) membuka peluang untuk membuat model ataupun pendekatan yang lain sedemikian hingga memberikan korelasi yang baik^[7]. Pengujian tetesan iso-propanol yang dijatuhkan melawan aliran udara panas menunjukkan bahwa laju penguapan yang menggunakan persamaan analogi Ranz-Marshall lebih kecil dari hasil pengujian. Keadaan ini sesuai dengan pengujian Walton (2004).

Model film stagnan perpindahan massa yang diterapkan pada model analogi Ranz-Marshall untuk tetesan air menghasilkan penyimpangan yang cukup besar dari data Walton (2004). Tetapi dengan model pendekatan baru yang diterapkan pada model analogi Ranz-Marshall, data Walton tersebut menghasilkan persamaan dengan korelasi yang baik. Berbeda dengan model film stagnan, pada model pendekatan baru, perpindahan massa bisa terjadi pada permukaan antar-fasa selama terjadi beda temperatur (terjadi perpindahan panas) meskipun tidak terjadi beda konsentrasi. Perpindahan massa pada permukaan antar-fasa ini disebabkan oleh perpindahan panas yang menimbulkan perubahan fasa (perpindahan massa penguapan / pengembunan) pada permukaan tersebut. Demikian juga perbedaan konsentrasi akan menimbulkan perubahan fasa (sebagai

akibat perpindahan massa) pada permukaan antar-fasa sehingga di sini terjadi perpindahan panas, meskipun tidak terjadi perbedaan temperatur. Kedua fenomena ini tidak terjadi pada model film stagnan.

2.7.1 Sherwood model pendekatan baru (Sh_{Mod})

$$Sh_{Mod} = \frac{k_{cLMod} \times d}{D_{AB}} \quad (2.21)$$

$$k_{cLMod} = \frac{k_c}{\theta_{Mod}} \quad (2.22)$$

$$\theta_{X_Mod} = \frac{k_c}{k_{cL}} \quad (2.23)$$

$$\theta_{X_Mod} = \frac{\ln(1 + R_x) - C_1}{R_x} \quad (2.24)$$

$$C_1 = -0,0011 \times (Tudara - Tdroplet) - 1,0082 \times (x_{A\infty} - x_0) \quad (2.25)$$

Sh_{Mod} = bilangan *sherwood* stagnan film

k_{cL_Mod} = koefisien perpindahan massa menuju nol [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]

d = diameter droplet [m]

D_{AB} = Difusivitas massa [m^2/s]

kc = koefisien perpindahan massa [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]

θ_{X_Mod} = faktor koreksi perpindahan massa

R_x = fluks perpindahan massa

C_1 = parameter perpindahan massa

2.7.2 Bilangan Nusselt model pendekatan baru

$$Nu_{Mod} = \frac{h_{LMod} \times diameter}{k} \quad (2.26)$$

$$h_{LMod} = \frac{h}{\theta_{T_Mod}} \quad (2.27)$$

$$\theta_{T_Mod} = \frac{h}{h_L} \quad (2.28)$$

$$\theta_{T_Mod} = \frac{\ln(1 + R_T)}{R_T} + \frac{C_{pA}}{k \times R_T} \cdot C_2 \quad (2.29)$$

$$C_2 = 0,4633E^{-09} \times (T_{udara} - T_{droplet}) + 0,16E^{-06} \times (x_{A\infty} - x_0) \quad (2.30)$$

- Nu_{Mod} = bilangan nusselt stagnan film
 h_{L_Mod} = koefisien perpindahan panas menuju nol [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]
 d = diameter droplet [m]
 k = konduktivitas panas udara [$W/m \cdot ^\circ C$]
 h = koefisien perpindahan panas [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]
 θ_{T_Mod} = faktor koreksi perpindahan panas
 R_T = fluks perpindahan panas
 C_2 = parameter perpindahan massa

2.8 Karakteristik Udara

1.1 DALAM LAJU PENGUAPAN TETESAN YANG SANGAT BERPERAN PENTING ADALAH UDARA. UDARA BERADA DIATAS PERMUKAAN LAPISAN BUMI DISEBUT DENGAN ATMOSFIR, ATAU ATMOSFIR UDARA. PADA ATMOSFIR BERTEKANAN RENDAH (*LOWER ATMOSFIR*) 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)^[8].

Kandungan uap air pada udara basah antara temperatur 0 – 100 ° 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

Udara dianggap sebagai gas ideal, sehingga hukum-hukum yang berlaku untuk gas ideal akan berlaku juga pada udara yaitu^[9] :

$$PV = mR_a T \quad (2.31)$$

P = tekanan atmosfer udara basah [Pa]

V = volume udara basah [m³]

m = massa udara basah [kg]

R_a = konstanta gas [kJ/kg.K]

2.9 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:

$$m = m_{da} + m_v \quad (2.32)$$

m_{da} = massa udara kering [kg]

m_v = massa uap air [kg]

Persamaan mol yang setara dengan pers.(2-32) adalah:

$$n = n_{da} + n_v \quad (2.33)$$

n = mole udara basah [kmole]

n_{da} = mole udara kering [kmole]

n_v = mole uap air [kmole]

Jika pers.(2.33) dibagi dengan jumlah mole udara basah (n) maka didapat:

$$\frac{n_{da}}{n} + \frac{n_v}{n} = 1 \quad (2.34)$$

$$x_{da} + x_v = 1 \quad (2.35)$$

$$x_o = \frac{P_v}{101325} \quad (2.36)$$

$$X = \frac{n_v}{n_a} = \frac{n_v}{n_{da}} \times \frac{n_{da}}{n_a} \quad (2.37)$$

$$pv = nRT = \frac{n}{M} RT \quad (2.38)$$

$$\frac{n}{v} = \frac{p}{RT} = \frac{101325}{8314.5 \cdot T_{\infty}} = C \quad (2.39)$$

$$x_o = \frac{\omega}{0.622(1 + \omega)} \quad (2.40)$$

x_{da} = fraksi mole udara kering [kmole/m³]

x_v = fraksi mole uap air [kmole/m³]

2.10 Kelembaban

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

2.10.1 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^[10]:

$$RH(\phi) = \frac{x_v}{x_{ws}} \quad (2.41)$$

x_{ws} = fraksi mol uap air jenuh pada suhu dan tekanan udara
[kmole/m³]

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.

2.10.2 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:

$$\omega = \frac{m_v}{m_{da}} \quad (2.42)$$

Dari pers.(2-32) dan pers.(2-37) didapat :

$$m = (1 + \omega)m_{da} \quad (2.43)$$

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 $p_v = RT$, 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).

$$\omega = \frac{m_v}{m_{da}} = \frac{p_v \cdot V / R_v \cdot T}{p_{da} \cdot V / R_{da} \cdot T} = \frac{p_v / R_v}{(p_t - p_v) / R_{da}} \quad (2.44)$$

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

$$\omega = \left(\frac{287}{461,5} \right) \left(\frac{p_v}{p - p_v} \right) = 0,622 \left(\frac{p_v}{p - p_v} \right) = 0,622 \frac{p_v}{p_{da}} \quad (2.45)$$

$$\rho_v = \rho \cdot \omega_v \quad (2.46)$$

$$\rho_o = \frac{m_v}{v} = \frac{m_v}{m} \cdot \frac{m}{v} \quad (2.47)$$

$$\rho_o = \omega_v \cdot \rho \quad (2.48)$$

$$C = \frac{n}{v} = \frac{m/M}{v} = \frac{\rho}{M} \quad (2.49)$$

$$n = \frac{m}{M} \quad (2.50)$$

$$\frac{P_v}{P_{da}} = \frac{n_v}{n_{da}} = \frac{m_v/18}{m_{da}/28.9} = \frac{\omega}{0.622} \quad (2.51)$$

$$\gamma = \omega = 0.622 \frac{P_v}{P_a - P_v} \quad (2.52)$$

$$P_a - P_v = 0.622 \cdot P_v \quad (2.53)$$

$$P_v = \frac{\gamma}{\gamma + 0.622} P_a \quad (2.54)$$

$$\omega_o = \frac{0.622 \cdot x_o}{1 + 0.378 \cdot x_o} \quad (2.55)$$

ω_o : Td = tabel uap P_v

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

2.11 Psychrometric Chart

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

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 %.

$$m = m_{da} + m_v \quad (2.56)$$

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 temperatur 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.

$$\omega = \frac{m_v}{m_{da}} \quad (2.57)$$

ω = rasio kelembaban (*humidity ratio*)

m_v = massa uap air [kg]

m_{da} = massa udara kering [kg]

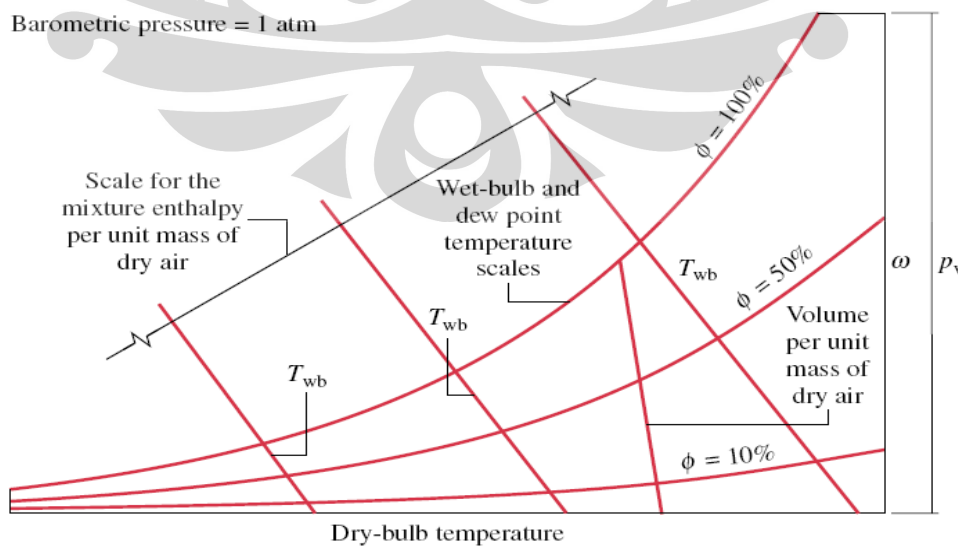
5. **Kelembaban relatif (*Relative humidity*)**. Merupakan kebasahan dari atmosfer yang dinyatakan dalam perbandingan antara tekanan parsial uap air udara basah dan tekanan uap air udara lembab yang jenuh pada suhu bola kering yang sama.

$$RH(\phi) = \frac{x_v}{x_{ws}} \quad (2.58)$$

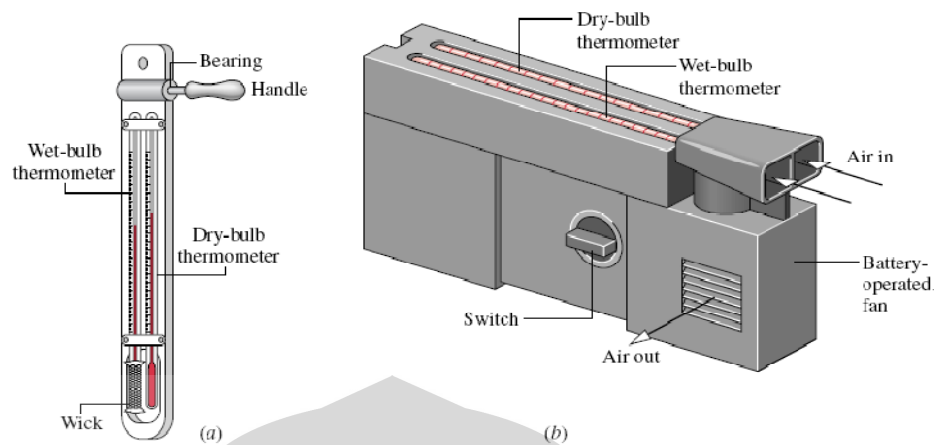
x_{ws} = fraksi mol uap air jenuh pada suhu dan tekanan udara [kmole/m³]

x_v = fraksi mole uap air [kmole/m³]

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 2.6 Skema Pembacaan Psychrometric Chart



Gambar 2.7 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^[11]:

$$h = h_{da} + h_w \quad (2.59)$$

h = entalpi udara basah [kJ/kg]

h_{da} = entalpi udara kering [kJ/kg]

h_w = entalpi uap air [kJ/kg]

2.12 Perpindahan Panas

2.12.1 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^[12] :

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.60)$$

h = koefisien konveksi [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]

T_s = temperatur permukaan [$^\circ C$]

T_∞ = temperatur ambien [$^\circ C$]

2.12.2 Konduksi

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

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.61)$$

Jika dimasukkan konstanta proporsionalitas maka persamaannya menjadi :

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.62)$$

q = laju perpindahan kalor [kJ/s]

k = konduktivitas termal [W/m.°C]

A = luas penampang [m²]

T = temperatur [°C]

x = jarak (panjang) perpindahan kalor [m]

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

2.12.3 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^[13]:

$$\frac{Q}{A} = \alpha \sigma (T_u^4 - T_d^4) \quad (2.63)$$

Q = radiasi [W]

A = luas permukaan [m²]

α = absorptivitas [m²/s.10⁴]

σ = konstanta stefant boltzman [W/m² K⁴]

T_u = temperatur sumber radiasi [K]

T_d = temperatur *droplet* [K]

2.12.4 Fluks perpindahan panas

$$\phi = \frac{-N \times C_{pA}}{h_L} \quad (2.64)$$

$$C_{pA} = cp \times 28,9 \quad (2.65)$$

- R_T = fluks perpindahan panas
 Φ = factor kecepatan perpindahan panas
 N = laju difusi molal [mol/s]
 h_L = koefisien perpindahan panas menuju nol [W/(m²/K)]
 C_{pA} = panas jenis molal udara [J/(kmole.K)]
 cp = panas jenis udara [kJ/kg.°C]

2.12.5 Laju Perpindahan Panas^[14]

$$q_0 = \frac{N_{AO} \cdot C_{pA} \cdot (T_\infty - T_0)}{\left[\exp\left(-\frac{N_{AO} \cdot C_{pA}}{h_L} - \frac{C_{pA} \cdot C_2}{k} \right) - 1 \right]} \quad (2.66)$$

- q_0 = laju perpindahan panas [W/m²]
 N_{AO} = laju perpindahan massa [kmole/(m².s)]
 h_L = koefisien perpindahan panas [W/(m²/K)]
 k = konduktivitas campuran [W/(mK)]
 C_2 = parameter perpindahan panas

2.13 Perpindahan Massa

2.13.1 Koefisien Perpindahan Massa

Koefisien perpindahan massa (*mass transfer coefficient*) dapat kita definisikan seperti halnya dengan koefisien perpindahan-kalor^[15], jadi:

$$m = k_c A (\rho_s - \rho_\infty) \quad (2.67)$$

$$k_c = \frac{Sh \cdot D}{d} \quad (2.68)$$

- m = fluks massa difusi komponen A [kg/s]
 k_c = koefisien konveksi massa [m/s]
 ρ_s = berat jenis uap pada permukaan [kg/m³]
 ρ_∞ = berat jenis *infinite* [kg/m³]
 Sh = bilangan Sherwood
 D = difusivitas [m²/s]
 d = diameter dalam lapisan air [m]

$A =$ luas permukaan yang dibasahi air (πdL) [m^2]

2.13.2 Difusi Dalam Gas

Gilliland mengusulkan rumus semi empiris untuk koefisien difusi dalam gas^[16]:

$$D_{VAA} = 1.166e-9 \exp \left[1,75 \ln \left(273 + \frac{(T_{in} + T_{out})}{2} \right)^{0.0555} \right] \quad (2.69)$$

Laju difusi molal :

$$N = \frac{\dot{m}}{M} \quad (2.70)$$

$$N = \frac{-dm/dt}{18.A} \quad (2.71)$$

Dimana $\frac{-dm}{dt} = \rho \frac{-dV}{dt}$ (2.72)

Dan $\frac{-dV}{dt} = Ax \frac{-dr}{dt}$ (2.73)

N = laju difusi molal [mol/s]

M = berat molekul [kg]

m = laju massa aliran (kg/s)

2.13.3 Fluks Perpindahan Massa (R_x)

$$R_x = \frac{x_0 - x_{A\infty}}{1 - x_{A\infty}} \quad (2.74)$$

R_x = fluks perpindahan massa

x_0 = fraksi mol uap pada permukaan droplet [$kmole/m^3$]

$x_{A\infty}$ = fraksi mol uap pada lingkungan [$kmole/m^3$]

2.13.4 Laju Perpindahan Massa (N_{AO})^[17]

$$N_{AO} = k_{cL} \left[\ln \left(\frac{1 - X_{\infty}}{1 - X_0} \right) - C_1 \right]$$

(2.75)

N_{AO} = laju perpindahan massa [$kmole/(m^2s)$]

K_{cL} = koefisien perpindahan massa [$\text{kmole}/(\text{m}^2\text{s})$]

C_1 = parameter perpindahan massa

2.14 Termokopel

Termokopel adalah sensor suhu yang banyak digunakan untuk mengubah perbedaan suhu dalam benda menjadi perubahan tegangan listrik (voltase). Termokopel yang sederhana dapat dipasang, dan memiliki jenis konektor standar yang sama, serta dapat mengukur temperatur dalam jangkauan suhu yang cukup besar dengan batas kesalahan pengukuran kurang dari 1°C .

2.14.1 Prinsip Termokopel

Pada tahun 1821, seorang fisikawan Estonia bernama Thomas Johann Seebeck menemukan bahwa sebuah konduktor (semacam logam) yang diberi perbedaan panas secara gradien akan menghasilkan tegangan listrik. Hal ini disebut sebagai efek termoelektrik. Untuk mengukur perubahan panas ini gabungan dua macam konduktor sekaligus sering dipakai pada ujung benda panas yang diukur. Konduktor tambahan ini kemudian akan mengalami gradiasi suhu, dan mengalami perubahan tegangan secara berkebalikan dengan perbedaan temperatur benda. Menggunakan logam yang berbeda untuk melengkapi sirkuit akan menghasilkan tegangan yang berbeda, meninggalkan perbedaan kecil tegangan memungkinkan kita melakukan pengukuran, yang bertambah sesuai temperatur. Perbedaan ini umumnya berkisar antara 1 hingga 70 microvolt tiap derajat celsius untuk kisaran yang dihasilkan kombinasi logam modern. Beberapa kombinasi menjadi populer sebagai standar industri, dilihat dari biaya, ketersediaannya, kemudahan, titik lebur, kemampuan kimia, stabilitas, dan hasil. Sangat penting diingat bahwa termokopel mengukur perbedaan temperatur di antara 2 titik, bukan temperatur absolut.

Pada banyak aplikasi, salah satu sambungan (sambungan yang dingin) dijaga sebagai temperatur referensi, sedang yang lain dihubungkan pada objek pengukuran. contoh, pada gambar di atas, hubungan dingin akan ditempatkan pada tembaga pada papan sirkuit. Sensor suhu yang lain akan mengukur suhu pada titik ini, sehingga suhu pada ujung benda yang diperiksa dapat dihitung. Termokopel dapat dihubungkan secara seri satu sama lain untuk membuat

termopile, dimana tiap sambungan yang panas diarahkan ke suhu yang lebih tinggi dan semua sambungan dingin ke suhu yang lebih rendah. Dengan begitu, tegangan pada setiap termokopel menjadi naik, yang memungkinkan untuk digunakan pada tegangan yang lebih tinggi. Dengan adanya suhu tetapan pada sambungan dingin, yang berguna untuk pengukuran di laboratorium, secara sederhana termokopel tidak mudah dipakai untuk kebanyakan indikasi sambungan langsung dan instrumen kontrol. Mereka menambahkan sambungan dingin tiruan ke sirkuit mereka yaitu peralatan lain yang sensitif terhadap suhu (seperti termistor atau dioda) untuk mengukur suhu sambungan input pada peralatan, dengan tujuan khusus untuk mengurangi gradiasi suhu di antara ujung-ujungnya.

Di sini, tegangan yang berasal dari hubungan dingin yang diketahui dapat disimulasikan, dan koreksi yang baik dapat diaplikasikan. Hal ini dikenal dengan kompensasi hubungan dingin. Biasanya termokopel dihubungkan dengan alat indikasi oleh kawat yang disebut kabel ekstensi atau kompensasi. Tujuannya sudah jelas. Kabel ekstensi menggunakan kawat-kawat dengan jumlah yang sama dengan konduktor yang dipakai pada Termokopel itu sendiri. Kabel-kabel ini lebih murah daripada kabel termokopel, walaupun tidak terlalu murah, dan biasanya diproduksi pada bentuk yang tepat untuk pengangkutan jarak jauh - umumnya sebagai kawat tertutup fleksibel atau kabel multi inti. Kabel-kabel ini biasanya memiliki spesifikasi untuk rentang suhu yang lebih besar dari kabel termokopel. Kabel ini direkomendasikan untuk keakuratan tinggi. Kabel kompensasi pada sisi lain, kurang presisi, tetapi murah. Mereka memakai perbedaan kecil, biasanya campuran material konduktor yang murah yang memiliki koefisien termoelektrik yang sama dengan termokopel (bekerja pada rentang suhu terbatas), dengan hasil yang tidak seakurat kabel ekstensi.

Kombinasi ini menghasilkan output yang mirip dengan termokopel, tetapi operasi rentang suhu pada kabel kompensasi dibatasi untuk menjaga agar kesalahan yang diperoleh kecil. Kabel ekstensi atau kompensasi harus dipilih sesuai kebutuhan termokopel. Pemilihan ini menghasilkan tegangan yang proporsional terhadap beda suhu antara sambungan panas dan dingin, dan kutub harus dihubungkan dengan benar sehingga tegangan tambahan ditambahkan pada

tegangan termokopel, menggantikan perbedaan suhu antara sambungan panas dan dingin.

2.14.2 Tipe-Tipe Termokopel

Tersedia beberapa jenis termokopel, tergantung aplikasi penggunaannya

1. Tipe K (Chromel (Ni-Cr alloy) / Alumel (Ni-Al alloy))

Termokopel untuk tujuan umum. Lebih murah. Tersedia untuk rentang suhu $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $+1200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2. Tipe E (Chromel / Constantan (Cu-Ni alloy))

Tipe E memiliki output yang besar ($68\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$) membuatnya cocok digunakan pada temperatur rendah. Properti lainnya tipe E adalah tipe non magnetik.

3. Tipe J (Iron / Constantan)

Rentangnya terbatas (-40 hingga $+750\text{ }^{\circ}\text{C}$) membuatnya kurang populer dibanding tipe K

4. Tipe J memiliki sensitivitas sekitar $\sim 52\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$

5. Tipe N (Nicrosil (Ni-Cr-Si alloy) / Nisil (Ni-Si alloy))

Stabil dan tahanan yang tinggi terhadap oksidasi membuat tipe N cocok untuk pengukuran suhu yang tinggi tanpa platinum. Dapat mengukur suhu di atas $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sensitifitasnya sekitar $39\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ pada 900°C , sedikit di bawah tipe K. Tipe N merupakan perbaikan tipe K. Termokopel tipe B, R, dan S adalah termokopel logam mulia yang memiliki karakteristik yang hampir sama. Mereka adalah termokopel yang paling stabil, tetapi karena sensitifitasnya rendah (sekitar $10\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$) mereka biasanya hanya digunakan untuk mengukur temperatur tinggi ($>300\text{ }^{\circ}\text{C}$).

6. Type B (Platinum-Rhodium/Pt-Rh)

Cocok mengukur suhu di atas $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tipe B memberi output yang sama pada suhu 0°C hingga 42°C sehingga tidak dapat dipakai di bawah suhu 50°C .

7. Type R (Platinum /Platinum with 7% Rhodium)

Cocok mengukur suhu di atas $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$. sensitivitas rendah ($10\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$) dan biaya tinggi membuat mereka tidak cocok dipakai untuk tujuan umum.

8. Type S (Platinum /Platinum with 10% Rhodium)

Cocok mengukur suhu di atas 1600 °C. sensitivitas rendah ($10 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$) dan biaya tinggi membuat mereka tidak cocok dipakai untuk tujuan umum. Karena stabilitasnya yang tinggi Tipe S digunakan untuk standar pengukuran titik leleh emas ($1064.43 \text{ }^\circ\text{C}$).

9. Type T (Copper / Constantan)

Cocok untuk pengukuran antara -200 to $350 \text{ }^\circ\text{C}$. Konduktor positif terbuat dari tembaga, dan yang negatif terbuat dari constantan. Sering dipakai sebagai alat pengukur alternatif sejak penelitian kawat tembaga. Type T memiliki sensitifitas $\sim 43 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

2.14.3 Penggunaan Termokopel

Termokopel paling cocok digunakan untuk mengukur rentangan suhu yang luas, hingga 1800 K. Sebaliknya, kurang cocok untuk pengukuran dimana perbedaan suhu yang kecil harus diukur dengan akurasi tingkat tinggi, contohnya rentang suhu 0 -- $100 \text{ }^\circ\text{C}$ dengan keakuratan $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$. Untuk aplikasi ini, Termistor dan RTD lebih cocok. Contoh Penggunaan Termokopel yang umum antara lain :

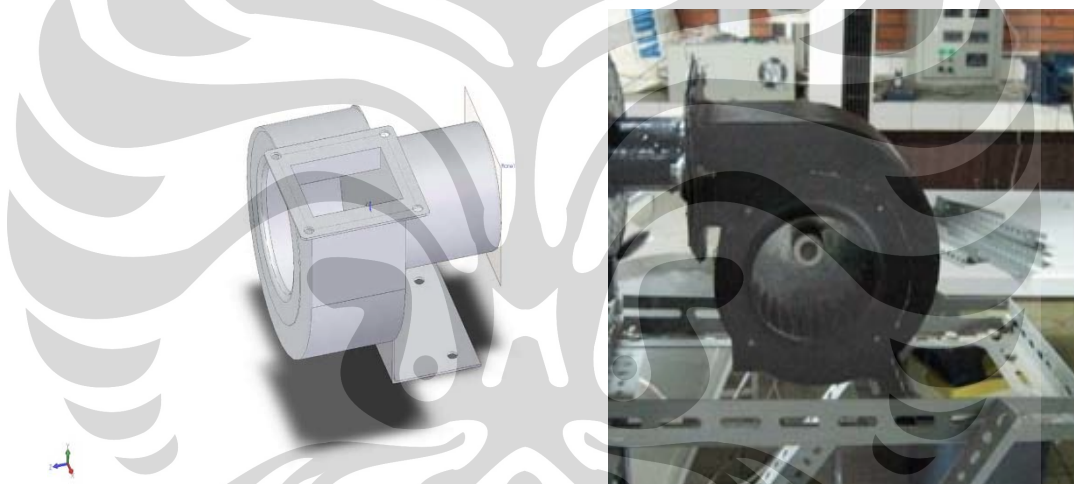
1. Industri besi dan baja
2. Pengaman pada alat-alat pemanas
3. Untuk termopile sensor radiasi
4. Pembangkit listrik tenaga panas radioisotop, salah satu aplikasi termopile.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Komponen Sistem

3.1.1 Blower

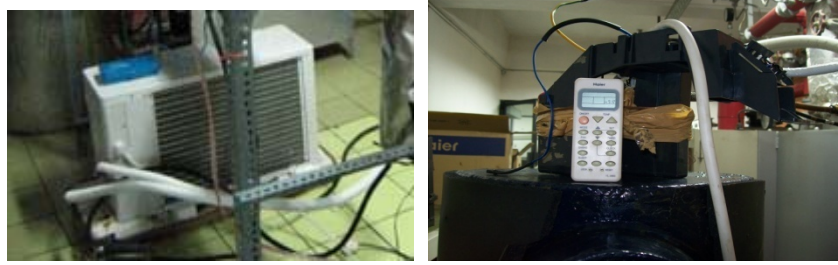
Blower ini dipasang pada sistem pengujian agar dapat menghasilkan kecepatan aliran pada sistem. Prinsip dari alat ini yaitu putaran baling-baling blower akan membuat perbedaan tekanan sehingga udara luar akan terhisap masuk ke dalam sistem pengujian. Jenis blower yang dipakai yaitu blower sentrifugal dengan debit $400\text{m}^3/\text{jam}$. Pengaturan kecepatan aliran yang dihasilkan blower dikontrol dengan inverter. Dibawah ini adalah gambaran bentuk dari blower yang digunakan pada sistem pengujian.



Gambar 3.1 *Blower*

3.1.2 Air Conditioner

Air Conditioner berfungsi untuk mengkondensasikan uap yang terbentuk pada tabung reaktor selama proses throttling berlangsung. Bagian evaporator AC ini diletakkan pada tabung 2, sedangkan bagian kondensornya tetap diletakkan diluar untuk melepaskan panas ke udara luar. Kontrol temperatur untuk AC ini tetap dipasang sehingga tetap bisa dilakukan perubahan setting suhu yang diinginkan.



Gambar 3.2 Air Conditioner dan Controller-nya

3.1.3 Tabung Dehumidifier

Tabung Dehumidifier berfungsi sebagai tempat pengkondensasian uap yang terbentuk selama proses ekspansi berlangsung. Sebuah evaporator AC dimasukan pada tabung kedua dengan diberikan dudukan agar tidak bergerak sekaligus mengarahkan uap yang mengalir agar hanya melalui evaporator itu saja. Lubang masuk yang dihubungkan dengan pompa vakum sengaja diletakan dibagian bawah evaporator dengan alasan agar fluida uap tidak terhisap keluar tabung, selain itu juga menjadi catatan disini bahwa diharapkan tekanan pada tabung kedua menjadi sedikit lebih rendah dari tabung pertama agar uap pada tabung pertama dapat mengalir ke tabung kedua.

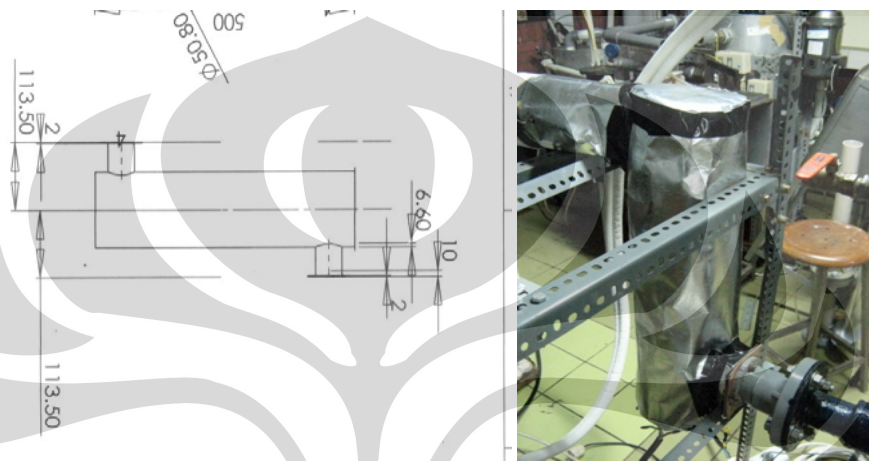
Kedua tabung dibuat dari pelat baja setebal 2 mm yang dibentuk menyerupai tabung kemudian bagian luarnya dibungkus dengan bahan "thermafleks" (biasa digunakan pada pembungkus pipa AC) agar temperatur lingkungan tidak mempengaruhi temperatur dalam tabung.



Gambar 3.3 Tabung Dehumidifier

3.1.4 Heater

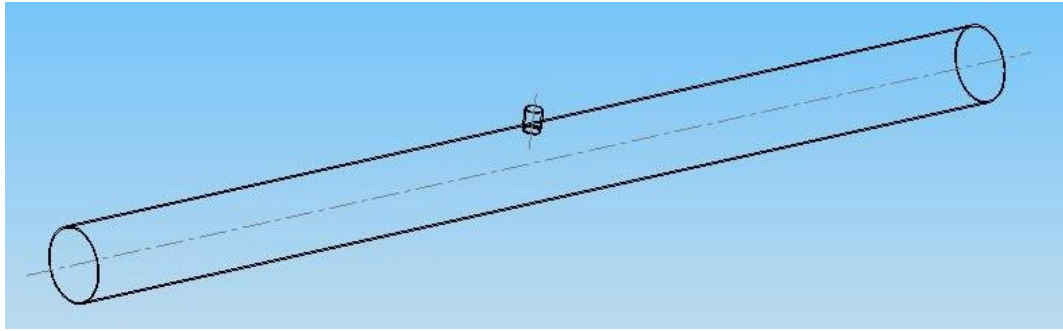
Alat ini berfungsi untuk memberikan panas terhadap udara yang dialirkan ke tetesan. Daya maksimal yang dapat dicapai oleh *heater* adalah 3 kW dengan tegangan 220 VAC. Pada *outlet heater* dipasang termokopel, agar temperatur yang dihasilkan *heater* dapat terbaca pada *temperature display* sehingga dapat dilakukan penyesuaian temperatur yang diinginkan.



Gambar 3.4 *Heater*

3.1.5 Pyrex

Test section yang digunakan pada pengujian ini adalah pipa pyrex. Pipa pyrex ini dipilih karena mempunyai kemampuan panas yang cukup tinggi sehingga pada saat dialirkan udara panas sebagai media untuk penguapan tetesan tidak menimbulkan kerusakan dan gangguan lainnya saat melakukan pengambilan data uji. Dimensi pipa pyrex ini mempunyai diameter dalam sebesar 96 mm dengan panjang 1500 mm. Untuk skema pada pipa pyrex dapat terlihat pada gambar dibawah ini, pada skema tersebut terlihat di tengah – tengah pyrex dibentuk lubang yang berfungsi untuk memasukkan suntikan dan *wire-probe thermocouple*. Pada lubang inilah yang dijadikan tempat untuk meletakkan sampel uji yang akan diuapkan.



Gambar 3.5 Pyrex

3.1.6 Digital controller.

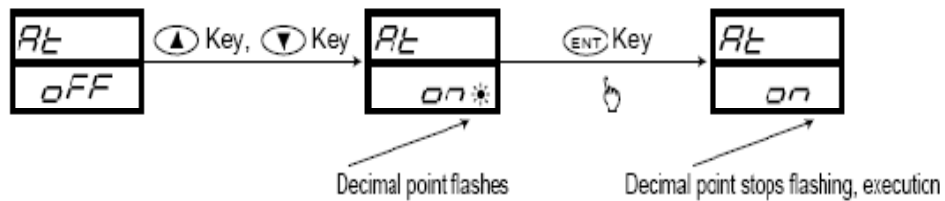
Komponen ini akan digunakan untuk mempermudah proses menstabilkan kondisi *heater* pada kondisi temperatur yang diinginkan dengan proses *auto-tuning* yang terintegrasi. Selain untuk membantu *heater* mencapai kondisi stabil, komponen ini juga digunakan untuk mengatur kerja dari heater agar tidak *over heat* pada saat melakukan proses pengujian, sehingga *heater* dapat bekerja dalam jangka waktu yang lama. Dibawah ini adalah skema dari digital Controller yang digunakan dengan merk SHIMADEN SR94.



Gambar 3.6 Digital controller

Proses penyesuaian dengan menggunakan digital controller ini dilakukan secara otomatis pada mode *auto tuning*, yakni controller itu akan bekerja menstabilkan temperatur sesuai dengan kondisi yang diinginkan, dengan menyesuaikan input tegangan yang diatur menggunakan sistem *PID controller* sehingga penyesuaian akan dilakukan secara perlahan. Oleh karena itu, prosesnya

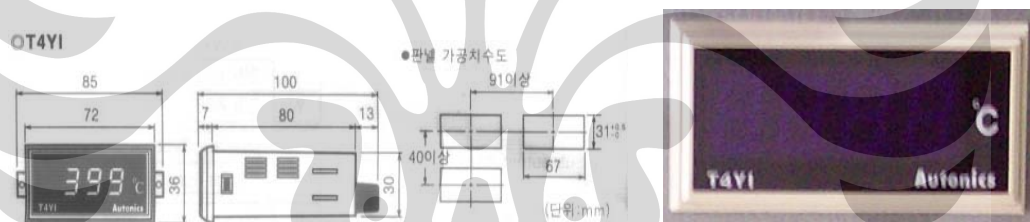
akan membutuhkan waktu yang lebih lama karena harus menyesuaikan dengan suhu yang diinginkan. Berikut ini skema pengaturan dengan mode *auto tuning*.



Gambar 3.7 Skema *Auto Tuning*

3.1.7 *Temperature display.*

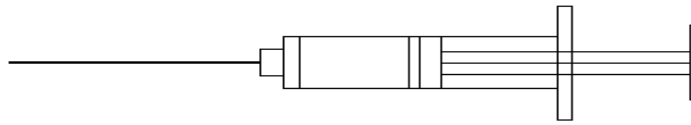
Komponen ini akan dihubungkan dengan *Wire probe thermocouple*, sehingga temperatur tetesan pada setiap aliran panas yang melaluinya dapat terukur. Untuk komponen ini akan menggunakan merk Autonics T4YI 220 VAC. *Display* ini hanya menampilkan pembacaan suhu dari *wire probe thermocouple*, tidak bisa mengatur suhu seperti *digital controller*.



Gambar 3.8 *Temperature display*

3.1.8 *Nosel*

Untuk membentuk tetesan maka diperlukan alat bantu berupa nosel dan *wire-probe thermocouple*. Nosel yang digunakan adalah jenis *spinal needle 23*, yang memiliki dimensi dengan panjang 90 mm dan diameter nosel 0.6 mm. Jenis nosel ini dipilih karena mempunyai panjang yang mencukupi untuk diletakkan di pyrex yang mempunyai diameter 96 mm. Nosel ini berfungsi untuk memasukkan fluida cair yang akan diukur dimensi dan suhunya. Saat nosel yang sudah diisi fluida cair ditekan, maka pada ujung jarum akan membentuk tetesan, sehingga tetesan ini akan jatuh pada *wire-probe thermocouple* kemudian temperatur tetesan dapat terukur dan bentuk tetesan dapat terlihat.

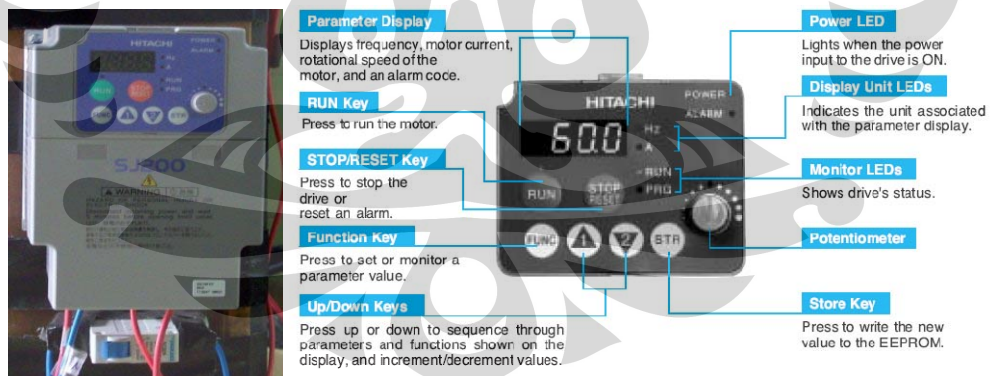


Gambar 3.9 Nosel

3.1.9 Inverter

Komponen inverter ini digunakan untuk mendapatkan variasi kecepatan udara dari blower. Proses untuk mendapatkan variasinya adalah dengan cara mengatur frekuensi listrik yang masuk ke *blower* dari frekuensi tegangan rendah sampai batas frekuensi tegangan PLN yang ditampakkan dengan pengaturan frekuensi (hertz), sehingga putaran *blower* bisa diatur. Sebagai batas pengaturan dari inverter ini berkisar antara nilai 0 s/d 50 Hz. Tetapi yang harus diperhatikan pada saat melakukan pengaturan adalah *inverter* ini membutuhkan waktu pada saat menetapkan suatu frekuensi pengaturan, jadi setelah menetapkan frekuensi pengaturan jangan langsung digunakan untuk melakukan pengujian tapi harus ditunggu beberapa saat agar kondisinya mencapai stabil.

Untuk lebih jelasnya mengenai inverter ini, dapat terlihat pada gambar berikut ini



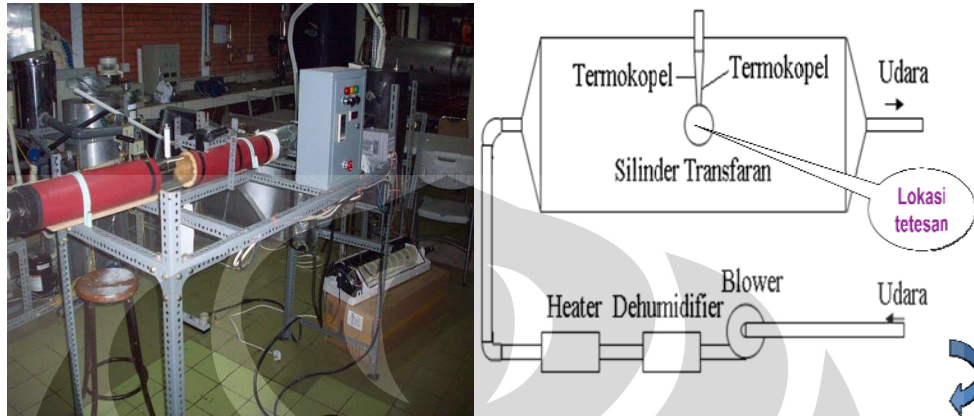
Gambar 3.10 Display Inverter SJ200

Spesifikasi Inverter :

- Tipe : AC Drivers
- Merk : Hitachi, SJ200
- Range : 0.75 kW (220 VAC)

Inverter tersebut bisa mengatur frekuensi tegangan input ke *blower* dengan ketelitian 0.1 Hz pada temperatur kerja ($25^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$).

3.2 Prinsip Alat Pengujian



Gambar 3.11 Skema Pengujian

Blower sentrifugal akan menghisap udara sekitar masuk ke dalam alat pengujian dan masuk kedalam dehumidifier. Udara yang masuk ke dehumidifier akan diturunkan kelembabannya sehingga kadar air yang terdapat dalam udara berkurang. Dari dehumidifier aliran udara akan diteruskan melalui heater dan panas yang dihasilkan heater akan diberikan ke udara dan digunakan untuk menguapkan tetesan yang berada pada pyrex.

3.3 Prosedur Kalibrasi Dan Pengambilan Data

Data yang diperoleh adalah dimensi tetesan yang dimasukkan ke *pyrex* melalui nosel. Ada beberapa tahapan sebelum akhirnya memperoleh dimensi tetesan. Penjelasan dapat dilihat pada sub-bab berikut.

3.3.1 Kalibrasi Kecepatan

Langkah awal sebelum melakukan pengambilan data adalah melakukan kalibrasi kecepatan pada posisi tetesan. Tahapan - tahapannya sebagai berikut :

1. Mengukur diameter dalam *pyrex*, dari pengukuran tersebut didapat diameter *pyrex* sebesar 96 mm, kemudian ditentukan titik tengah dari *pyrex* tersebut (pada posisi tetesan / lubang pada *pyrex*).
2. *Blower* dihidupkan dengan mengatur frekuensi pada *inverter*. Frekuensi untuk pengambilan data adalah 7 Hz, 10 Hz, dan 15 Hz.

3. *Heater* dihidupkan lalu diatur temperaturnya. Temperatur untuk pengambilan data adalah 50°C, 75°C, 100°C, dan 150°C. Untuk setiap pengaturan suhu, hidupkan mode auto tuning pada posisi on.
4. Meletakkan *hot wire anemometer* di posisi tetesan (lubang pada *pyrex*).
5. Bila suhu dan frekuensi telah diatur, keadaan tunak dapat dicapai sekitar 10-15 menit (*temperature display* menunjukkan angka yang stabil).
6. Setelah keadaan menjadi tunak, pengambilan data yang terbaca pada hotwire dapat dilakukan.
7. Dalam melakukan pengambilan data usahakan mengatur temperatur dan frekuensi dimulai dari yang terkecil sampai terbesar.

3.3.2 Pengambilan Data Foto

Pengambilan data dimensi tetesan dengan melakukan mengambil foto tetesan pada selang waktu tertentu. Langkah – langkahnya sebagai berikut :

1. Catat temperatur bola basah (*twb*) dan bola kering (*tdb*) sebelum melakukan penelitian.
2. Meletakkan kamera digital berikut *tripod* di depan *test section*, lalu posisi kamera diatur dengan sudut pencahayaan lampu dan menetapkan agar didapatkan gambar yang lebih jelas, kemudian mengatur *zoom* dan fokus yang diupayakan sampai pada kemampuan maksimalnya agar gambar tersebut dapat terlihat pada pixel yang besar sehingga diharapkan kesalahan pada pixelnya lebih kecil. Kemudian layar kamera digital dihidupkan, sehingga terlihat gambar ujung jarum dan *wire probe thermocouple*.



Gambar 3.12 Posisi jarum dan tetesan

3. Menghidupkan *blower* yang langsung dihubungkan dengan *inverter* dan mengatur kecepatannya melalui frekuensi pada *inverter*, kecepatan *blower* yang menghasilkan aliran diatur dengan menetapkan frekuensi pada *inverter*.



Gambar 3.13 Panel Sistem Listrik

4. *Heater* dihidupkan dan dengan mode *auto tuning setup* melalui *digital controller* temperatur, *heater* akan diatur mencapai kondisi yang diinginkan. Range temperatur yang akan dicapai untuk proses pengambilan data adalah : 50, 75, 100 dan 150°C.
5. Setelah temperatur *digital controller* menunjukkan angka yang relatif konstan sesuai dengan temperatur yang diinginkan, maka suntikan ditekan sampai terbentuk tetesan yang baik.



Gambar 3.14 Tetesan

6. Menekan *shutter* kamera digital pada interval waktu setiap 2 detik selama 60 detik untuk mengamati saat tetesan mulai mengecil, catat penunjukan suhu pada *wire probe-thermocouple display* sebagai temperatur tetesan pada saat pengujian dan kemudian catat juga waktu pengambilan foto yang ada di kamera digital.
7. Mengulangi langkah nomor 2 sampai dengan 6 untuk variasi frekuensi 7; 10; dan 15 Hz.
8. Mengulangi langkah nomor 2 sampai dengan 7 untuk variasi temperatur 50, 75, 100 dan 150 °C.

3.3.3 Pengolahan Foto

Setelah diperoleh data dalam bentuk foto digital, maka selanjutnya dilakukan pengolahan data untuk memperoleh dimensi tetesan. Pengolahan data menggunakan *software paint* untuk mengukur panjang, lebar dan diameter dari tetesan (*droplet*). Langkah kerja sebagai berikut :

- Tahapan kalibrasi
 1. Melakukan proses foto pada "mata bor" dengan ukuran 3 mm.
 2. Proses foto dilakukan dengan memaksimalkan kemampuan dari kamera digital (pada kondisi *zoom* maksimal).
 3. Setelah mendapatkan gambar, kemudian dilakukan *image processing* dengan *software paint* untuk mendapatkan besaran *pixel* dari gambar "mata bor" tersebut.
 4. Setelah didapatkan besaran *pixel*, selanjutnya tinggal membagi ukuran nyata dari "mata bor" dalam satuan milimeter (mm) dengan besaran *pixel*

dari hasil *image processing* dan dicari nilai rata – ratanya dari keempat variasi tersebut. Sehingga akan didapatkan konversi $1 \text{ pixel} = 6 \times 10^{-6} \text{ m}$

- Tahapan pengolahan foto tetesan (*droplet*)

1. Membuka file gambar dengan menggunakan *software Paint*.
2. Setelah file terbuka, dilakukan pembesaran bidang *droplet*. Kemudian dilakukan pengaturan skala untuk memperjelas batas yang akan dipilih.
3. Setelah ditentukan batasnya, pada *software* tersebut akan dapat terlihat besaran pixel dari gambar tetesan (*droplet*) yang sedang diolah.
4. Kemudian tinggal mencatat besaran *pixel* untuk lebar dan panjang dari gambar tetesan (*droplet*) tersebut dan langsung dikonversikan dengan hasil kalibrasi dari “mata bor” untuk mendapatkan ukurannya dalam satuan millimeter (mm).
5. Menyimpan hasil pencatatan data dalam bentuk tabel excel agar dapat diolah dengan sistematis.

3.4 Pengolahan Data

Pengolahan data non ac garam 5%

Dalam melakukan proses analisa tentang fenomena yang terjadi untuk perpindahan massa (*mass transfer*) dan perpindahan panas (*heat transfer*) pada data yang telah diambil akan menggunakan empat metode perhitungan yakni rumus model umum, *stagnant film model* dan pendekatan baru pada *stagnant film model* (E. A. Kosasih, 2006) serta pendekatan secara eksperimental. Dari keempat metode diatas mempunyai ciri khasnya masing – masing sesuai dengan faktor – faktor apa saja yang dapat berpengaruh pada masing – masing metode perhitungan. Untuk lebih jelasnya dapat terlihat pada penjelasan berikut ini:

Mengambil satu contoh perhitungan data, yaitu non ac garam 5% :

1. Frekuensi *inverter* = 7 Hz
2. Waktu pengambilan foto pada detik ke-60
3. Pada kondisi non ac, $T_{db} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{wb} = 26 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
4. T_{udara} pada termokopel = $49 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{droplet} = 31 \text{ }^{\circ}\text{C}$

5. Dari hasil pengukuran diperoleh dimensi droplet :

- Lebar = $476.5 \text{ pixel} \times \text{Faktor Kalibrasi Mata Bor } 3\text{mm}$
= $476.5 \text{ pixel} \times (0.003\text{m} \div 500 \text{ pixel})$
= $2.859 \times 10^{-3} \text{ m}$
- Tinggi = $498 \text{ pixel} \times \text{Faktor Kalibrasi Mata Bor } 3\text{mm}$
= $498 \text{ pixel} \times (0.003\text{m} \div 500 \text{ pixel})$
= $2.988 \times 10^{-3} \text{ m}$
- Selisih : Lebar = $13 \text{ pixel} \times (0.003\text{m} \div 500 \text{ pixel})$
= $7.8 \times 10^{-5} \text{ m}$
Tinggi = $20 \text{ pixel} \times (0.003\text{m} \div 500 \text{ pixel})$
= $1.2 \times 10^{-4} \text{ m}$

Selanjutnya bisa dilakukan langkah-langkah analisa perhitungan sebagai berikut :

1. Menghitung d (diameter rata-rata tetesan).

$$d = \left(\frac{d_{lebar} + d_{tinggi}}{2} \right)$$

$$d = \left(\frac{0.002859 + 0.002988}{2} \right)$$

$$d = 2,924.10^{-3} \text{ m}$$

2. Menghitung $\frac{dd}{dt}$

$$\frac{dd}{dt} = \frac{\text{Peluruhan}}{\text{Waktu}}$$

$$\frac{dd}{dt} = \left(\frac{0,000078 + 0,00012}{2} \right)$$

$$\frac{dd}{dt} = \frac{\quad}{60 \text{ s}}$$

$$\frac{dd}{dt} = 1,65 \text{ E}^{-06} \text{ kg/s}$$

3. Menghitung laju difusi molal (N).

$$\frac{-dm/dt}{A} = \rho \cdot \frac{dv/dt}{A}$$

$$\frac{dv/dt}{A} = \frac{dr}{dt}$$

$$\frac{dr}{dt} = \frac{dd/dt}{2}$$

$$\frac{dr}{dt} = \frac{1,65E^{-06}}{2}$$

$$\frac{dr}{dt} = 8,25E^{-07}$$

$$N = \frac{-dm/dt}{18 \cdot A}$$

$$N = \frac{\rho_{air} \cdot 8,25E^{-07}}{18}$$

$$N = \frac{998,4 \times 8,25E^{-07}}{18}$$

$$N = 4,576E^{-05} \text{ kmole} / \text{s.m}^2$$

4. Menghitung fraksi mol uap pada permukaan droplet (X_{A0}).

Tekanan uap (P_0) pada temperatur droplet 31°C adalah $4491,3 \text{ Pa}$ (interpolasi) dari tabel H_2O jenuh pada lampiran. Pada tetesan droplet mengandung garam 5% sehingga dicari dahulu P_{0A} .

$$X_{NaCl} = \frac{n_v}{n_a} = \frac{n_v}{n_{da} + n_v}$$

$$X_{NaCl} = \frac{2,5}{\frac{58,5}{2,5} + \frac{95}{18}}$$

$$X_{NaCl} = \frac{1}{1 + \left(\frac{95}{18} \times \frac{58,5}{2,5} \right)}$$

$$X_{NaCl} = \frac{1}{1 + \left(\frac{95}{18} \times \frac{58,5}{10} \right)}$$

$$X_{NaCl} = 3,137E^{-02}$$

$$X_{NaCl} + X_{OA} = 1$$

$$X_{OA} = 1 - X_{NaCl}$$

$$X_{OA} = 1 - 3,137 E^{-02}$$

$$X_{OA} = 0,9686$$

$$p_{OA} = X_{OA} \times p_o$$

$$p_{OA} = 0,9686 \times 4491,3$$

$$p_{OA} = 4350,39 Pa$$

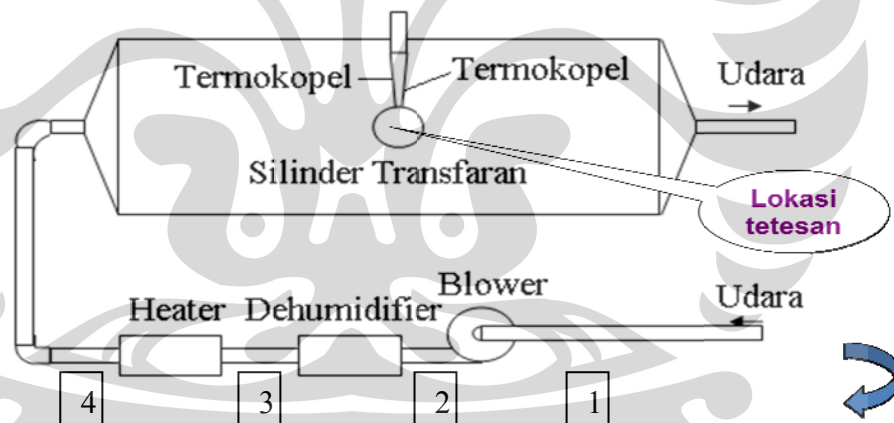
Sehingga :

$$X_o = \frac{p_{OA}}{P_{udara}}$$

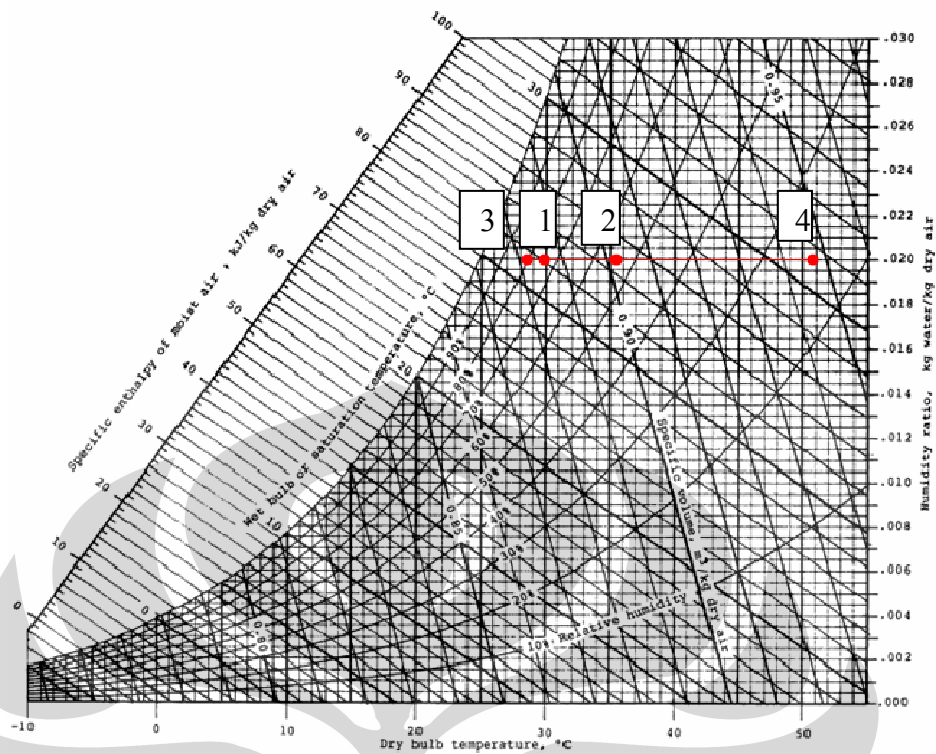
$$X_o = \frac{4350,39}{101325}$$

$$X_o = 0,04293 \text{Kmo le/m}^3$$

5. a. Mencari rasio kelembaban (ω) dehumidifier non ac dengan menggunakan diagram psikometri.



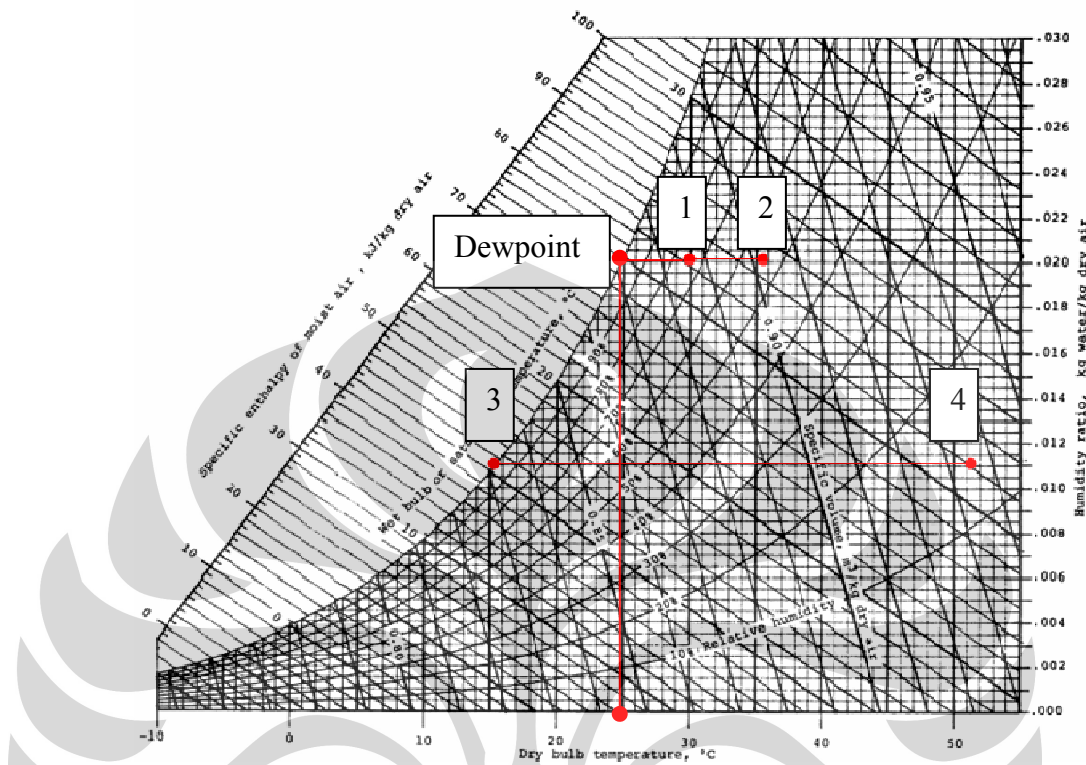
Gambar 3.15 Skema Aliran Udara



Gambar 3.16 Psikometri non AC

Pada diagram psikometri terlihat titik 1, 2, 3, dan 4. Titik 1 ($T_{db}=30^{\circ}\text{C}$ dan $T_{wb}=26^{\circ}\text{C}$) adalah temperatur ketika udara berada di luar blower yang diukur menggunakan sling. Ketika udara masuk ke dalam blower maka terdapat kenaikan suhu dry bulb dan wet bulb dikarenakan suhu kerja blower yang naik lalu udara menuju dehumidifier (titik 2). Di dehumidifier (non ac) udara akan dikurangi kandungan uap airnya dan udara keluar dehumidifier (titik 3). Dari dehumidifier udara akan masuk ke heater dan mengalami peningkatan suhu sehingga pada keluaran heater, suhunya mencapai 51°C (titik 4). Maka didapat nilai ω sebesar 0,02.

b. Mencari rasio kelembaban (ω) dehumidifier ac dengan menggunakan diagram psikometri. Nilai ω ini akan digunakan pada perhitungan data ac.



Gambar 3.17 Psikometri AC

Pada diagram psikometri terlihat titik 1, 2, 3, dan 4. Titik 1 adalah temperatur ketika udara berada di luar blower. Ketika udara masuk ke dalam blower maka terdapat kenaikan suhu *dry bulb* dan *wet bulb* dikarenakan suhu kerja blower yang naik sehingga mempengaruhi suhu udara lalu udara menuju dehumidifier (titik 2). Di dehumidifier (ac) udara akan dikurangi kandungan uap airnya. Karena menggunakan ac ($t_{db} = t_{wb}$) maka terjadi pengembunan karena suhu keluaran dehumidifier berada dibawah suhu *dewpoint* (titik 3). Pada titik 3 ini suhu yang terukur keluaran dehumidifier adalah 16°C . Dari dehumidifier udara akan masuk ke heater dan mengalami peningkatan suhu sehingga pada keluaran heater, suhunya mencapai 51°C (titik 4). Maka didapat nilai ω sebesar 0,011.

6. Menghitung fluks perpindahan massa (R_x).

$$R_x = \frac{X_o - X_{A\infty}}{1 - X_o}$$

$$R_x = \frac{0,04293 - 0,0311}{1 - 0,04293}$$

$$R_x = 0,01236$$

7. Menghitung konsentrasi total udara (C).

T_{film} adalah temperatur udara pada termokopel saat belum di berikan tetesan ditambah temperatur setelah diberikan tetesan.

$$T_f = t_u + t_d$$

$$T_f = 273 + \left(\frac{49 + 31}{2} \right)$$

$$T_f = 313K$$

C diperoleh dari :

$$C = \frac{n}{V} = \frac{P}{RT}$$

$$C = \frac{101325}{8314,5 \times 313}$$

$$C = 0,03893 \text{ kmol/m}^3$$

8. Menghitung koefisien perpindahan massa (k_c).

$$k_c = \frac{Nx(1 - x_o)}{Cx(x_o - x_{Ao})}$$

$$k_c = \frac{4,576 E^{-05} (1 - 0,04293)}{0,03893 (0,04293 - 0,0311)}$$

$$k_c = 0,0949 \text{ kmole / m}^2 \cdot \text{s}$$

9. Menghitung difusivitas massa A dalam B (D_{AB}).

$$D_{AB} = 0,1166 E^{-08} \times e^{1,75 \times \ln T_F}$$

$$D_{AB} = 2,72 E^{-05} \text{ m}^2 / \text{s}$$

10. Menghitung faktor koreksi perpindahan massa untuk model analogi stagnan film (θ_{StF}).

$$\theta_{StF} = \frac{k_c}{k_{cL}} = \frac{\ln(1 + R_x)}{R_x}$$

$$\theta_{StF} = \frac{\ln(1 + 0,01236)}{0,01236}$$

$$\theta_{StF} = 0,9938$$

11. Menghitung koefisien laju perpindahan massa model stagnan film k_c menuju k_{cLSIF} ketika N_{A0} menuju nol.

$$k_{cLSIF} = \frac{k_c}{\theta_{StF}}$$

$$k_{cLSIF} = \frac{0,0949}{0,9938}$$

$$k_{cLSIF} = 0,095 \text{ kmole} / \text{m}^2 \text{ s}$$

12. Menghitung Sherwood model stagnan film (Sh_{StF}).

$$Sh_{StF} = \frac{k_{cLSIF} \times \text{diameter}}{D_{AB}}$$

$$Sh_{StF} = \frac{0,095 \times 0,002924}{2,72 E^{-05}}$$

$$Sh_{StF} = 10,2125$$

13. Menentukan parameter perpindahan massa (C_1).

$$C_1 = -0,0011 \times (T_{udara} - T_{droplet}) - 1,0082 \times (x_{A\infty} - x_0)$$

$$C_1 = -0,0011 \times (49 - 31) - 1,0082 \times (0,0311 - 0,04293)$$

$$C_1 = -0,00787$$

14. Menghitung faktor koreksi perpindahan massa untuk model analogi pendekatan baru (θ_{Mod}).

$$\theta_{Mod} = \frac{k_c}{k_{cL}} = \frac{\ln(1 + R_x) - C_1}{R_x}$$

$$\theta_{Mod} = \frac{\ln(1 + 0,01236) - (-0,00787)}{0,01236}$$

$$\theta_{Mod} = 1,631$$

15. Menghitung koefisien laju perpindahan massa model pendekatan baru k_c menuju k_{cLMod} ketika N_{A0} menuju nol.

$$k_{cLMod} = \frac{k_c}{\theta_{Mod}}$$

$$k_{cLMod} = \frac{0.0949}{1,631}$$

$$k_{cLMod} = 0,0582 \text{ kmole} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$$

16. Menghitung Menghitung Sherwood model pendekatan baru (Sh_{Mod}).

$$Sh_{Mod} = \frac{k_{cLMod} \times \text{diameter}}{D_{AB}}$$

$$Sh_{Mod} = \frac{0,0582 \times 0,002924}{2,72 E^{-05}}$$

$$Sh_{Mod} = 6,2565$$

17. Mencari angka reynold (Re) pada droplet.

$$Re = \frac{\rho u_{\max} d_{rata-rata}}{\mu}$$

$$Re = \frac{u_{Max} \cdot d_{rata-rata}}{\nu}$$

Dimana :

ρ = massa jenis udara (kg/m^3)

U_{\max} = kecepatan pada droplet (m/s)

$d_{rata-rata}$ = diameter rata – rata (m)

μ = viskositas dinamik ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)

ν = viskositas kinematik (m^2/s)

Asumsi Kecepatan di droplet ialah kecepatan maksimum, droplet berada di tengah sehingga $U_{\max} = 0,4013 \text{ m/s}$ dan $\nu = 1,691E-05 \text{ m}^2/\text{s}$.

$$Re = \frac{u_{Max} \cdot d_{rata-rata}}{\nu}$$

$$Re = \frac{0,40132 \times 0,002924}{1,7E - 05}$$

$$Re = 69,03$$

18. Menghitung bilangan Prandtl.

$$Pr = \frac{\mu}{\alpha} = \frac{1,7 \cdot 10^{-5}}{2,387 \cdot 10^{-5}} = 0,71026$$

19. Menghitung bilangan Schmidt.

$$Sc = \frac{\mu}{D_{AB}} = \frac{1,7 \cdot 10^{-5}}{2,72 \cdot 10^{-5}} = 0,625$$

20. Menghitung bilangan Lewis.

$$Le = \frac{Sc}{Pr} = \frac{0,625}{0,71026} = 0,879$$

21. Menghitung bilangan Sherwood (persamaan Ranz - Marshall).

$$Sh = 2 + (0,55x Re^{1/2} .Sc^{1/3})$$

$$Sh = 2 + (0,55x8,308 \times 0,855)$$

$$Sh = 5,907$$

Langkah-langkah Mencari Perpindahan Panas.

22. Menghitung nilai konduktivitas campuran (K) dengan $T_f = 313$ K sehingga dapat dicari nilai rapat massa udara (ρ), panas jenis udara (cp), dan difusivitas termal (α) dari tabel sifat-sifat udara.

$$k = \rho \times cp \times \alpha$$

$$k = 1,125 \times 1007,665 \times 2,387 E^{-05}$$

$$k = 0,0271 [W / (mK)]$$

23. Menghitung $Q_{radiasi} / A$.

$$\frac{Q_{radiasi}}{A} = 0,96 \times 0,566959 E^{-07} \times ((273 + T_{udara})^4 - (273 + T_{droplet})^4)$$

$$\frac{Q_{radiasi}}{A} = 0,96 \times 0,566959 E^{-07} \times ((273 + 49)^4 - (273 + 31)^4)$$

$$\frac{Q_{radiasi}}{A} = 120,2672 [W / m^2]$$

24. Menghitung Q_o/A , dengan konduksi dari termokopel $Q_{konduksi} = 202,2824$ dan kalor laten pada temperatur droplet $31^\circ C$ sebesar $h_{fg} = 2428319$ J/kg dari tabel sifat air jenuh.

$$\frac{Q_o}{A} = -N \times 18 \times h_{fg} + \frac{Q_{konduksi}}{A} + \frac{Q_{radiasi}}{A}$$

$$\frac{Q_o}{A} = -4,576 E^{-05} \times 18 \times 2428319 + 202,2824 + 120,2672$$

$$\frac{Q_o}{A} = -1677,61 [W / m^2]$$

25. Menghitung koefisien perpindahan panas h .

$$h = \frac{\frac{Q_o}{A}}{(T_{droplet} - T_{udara})}$$

$$h = \frac{-1677,61}{(31 - 49)}$$

$$h = 93,2 [W / (m^2 K)]$$

26. Menghitung koefisien perpindahan panas h menuju h_L ketika N_{A0} menuju nol.

$$h_L = \frac{(2 + 0,55 \times Re^{\frac{1}{2}} \times Pr^{0,333}) \times k}{diameter}$$

$$h_L = \frac{(2 + 0,55 \times 69,03^{0,5} \times 0,71026^{0,333}) \times 0,027129}{0,002924}$$

$$h_L = 56,38 [W / (m^2 K)]$$

27. Menghitung faktor kecepatan perpindahan panas

$$\phi = \frac{-N \times C_{pA}}{h_L}$$

$$\phi = \frac{-4,576E^{-05} \times 29121}{56,38}$$

$$\phi = -0,02$$

28. Menghitung fluks perpindahan panas (R_T).

$$R_T = e^{\phi} - 1$$

$$R_T = e^{-0,02228} - 1$$

$$R_T = -0,02203$$

29. Menghitung faktor koreksi perpindahan massa untuk model analogi stagnan film (θ_{StF}).

$$\theta_{StF} = \frac{h}{h_L} = \frac{Ln(1 + R_T)}{R_T}$$

$$\theta_{StF} = \frac{\ln(1 + (-0,02203))}{-0,02203}$$

$$\theta_{StF} = 1,011$$

30. Menghitung panas jenis molal udara C_{pA} .

$$C_{pA} = cp \times 28,9$$

$$C_{pA} = 1007,665 \times 28,9$$

$$C_{pA} = 29121,52 [J / (kmoleK)]$$

31. Menghitung parameter perpindahan panas (C_2).

$$C_2 = -0,4633E^{-09} \times (T_{udara} - T_{droplet}) + 0,16E^{-06} \times (x_{A\infty} - x_O)$$

$$C_2 = -0,4633E^{-09} \times (49 - 31) + 0,16E^{-06} \times (0,0311 - 0,04293)$$

$$C_2 = -1,023 \cdot 10^{-8}$$

32. Menghitung faktor koreksi perpindahan massa untuk model analogi pendekatan baru (θ_{Mod}).

$$\theta_{Mod} = \frac{h}{h_L} = \frac{Ln(1 + R_T)}{R_T} + \frac{C_{pA}}{k \times R_T} \cdot C_2$$

$$\theta_{Mod} = \frac{\ln(1 + (-0,02203))}{-0,02203} + \frac{29121,52 \times (-1,023 E^{-08})}{0,0271 \times (-0,02203)}$$

$$\theta_{Mod} = 1,510$$

33. Menghitung koefisien laju perpindahan panas model stagnan film h menuju h_{LSIF} ketika N_{A0} menuju nol.

$$h_{LSIF} = \frac{h}{\theta_{StF}}$$

$$h_{LSIF} = \frac{93,2}{1,011}$$

$$h_{LSIF} = 92,18 [W / m^2 \cdot K]$$

34. Menghitung koefisien laju perpindahan panas model pendekatan baru h menuju h_{LMod} ketika N_{A0} menuju nol.

$$h_{LMod} = \frac{h}{\theta_{Mod}}$$

$$h_{LMod} = \frac{93,2}{1,510}$$

$$h_{LMod} = 61,72 [W / m^2 \cdot K]$$

35. Menghitung bilangan Prandtl (Pr)

Dengan $T_f = 313K$ dapat dicari nilai Pr dari table sifat-sifat udara tekanan atmosfer yaitu

$$Pr = \frac{\mu}{\alpha} = \frac{1,7 \cdot 10^{-5}}{2,387 \cdot 10^{-5}} = 0,71026$$

36. Menghitung bilangan Nusselt (pers. Ranz - Marshall).

$$Nu = 2 + (0,55x Re^{1/2} . Pr^{1/3})$$

$$Nu = 2 + (0,55x69,03^{0,5} \times 0,71026^{0,333})$$

$$Nu = 6,0769$$

37. Menghitung bilangan Nusselt model analogi stagnan film.

$$Nu_{StF} = \frac{h_{LSIF} \times diameter}{k}$$

$$Nu_{StF} = \frac{92,18 \times 0,002924}{0,0271}$$

$$Nu_{StF} = 9,9459$$

38. Menghitung bilangan Nusselt model analogi stagnan film.

$$Nu_{Mod} = \frac{h_{LMod} \times diameter}{k}$$

$$Nu_{Mod} = \frac{61,72 \times 0,002924}{0,0271}$$

$$Nu_{Mod} = 6,659$$

Perbandingan antara ac garam 5% dan non ac garam 5%

Berikut merupakan perhitungan untuk laju perpindahan panas dan perpindahan massa untuk ac dan non ac garam 5%.

1. Data untuk non ac garam 5% berdasarkan perhitungan

Perpindahan massa non ac garam 5%

$$N_{AO} = k_{cL} \left[\ln \left(\frac{1 - X_{\infty}}{1 - X_O} \right) - C_1 \right]$$

$$N_{AO} = 0,0554 \left[\ln \left(\frac{1 - 0,0311}{1 - 0,04293} \right) - (-0,00787) \right]$$

$$N_{AO} = 1,11610^{-3} [kmole / (m^2 s)]$$

Perpindahan panas non ac garam 5%

$$q_o = \frac{N_{AO} \cdot C_{PA} \cdot (T_\infty - T_o)}{\left[\exp \left(-\frac{N_{AO} \cdot C_{PA}}{h_L} - \frac{C_{PA}}{k} C_2 \right) - 1 \right]}$$

$$q_o = \frac{1,116 \cdot 10^{-3} \cdot 1007,665 \cdot 28,9 \cdot (49 - 31)}{\left[\exp \left(-\frac{1,116 \cdot 10^{-3} \cdot 1007,665 \cdot 28,9}{56,32} - \frac{1007,665 \cdot 28,9}{0,0271} \cdot -1,023 \cdot 10^{-8} \right) - 1 \right]}$$

$$q_o = 1353,52 [W / m^2]$$

2. Data untuk ac garam 5% berdasarkan perhitungan

Perpindahan massa untuk ac garam 5%

$$N_{AO} = k_{cL} \left[\ln \left(\frac{1 - X_\infty}{1 - X_o} \right) - C_1 \right]$$

$$N_{AO} = 0,0554 \left[\ln \left(\frac{1 - 0,017634}{1 - 0,04293} \right) - (0,00557) \right]$$

$$N_{AO} = 1,129 \cdot 10^{-3} [kmole / (m^2 s)]$$

Perpindahan panas ac garam 5%

$$q_o = \frac{N_{AO} \cdot C_{PA} \cdot (T_\infty - T_o)}{\left[\exp \left(-\frac{N_{AO} \cdot C_{PA}}{h_L} - \frac{C_{PA}}{k} C_2 \right) - 1 \right]}$$

$$q_o = \frac{1,129 \cdot 10^{-3} \cdot 1007,665 \cdot 28,9 \cdot (49 - 31)}{\left[\exp \left(-\frac{1,4197 \cdot 10^{-3} \cdot 1007,612 \cdot 28,9}{56,32} - \frac{1007,665 \cdot 28,9}{0,0271} \cdot -12,387 \cdot 10^{-9} \right) - 1 \right]}$$

$$q_o = 1360,48 [W / m^2]$$

Perhitungan diatas adalah perbandingan data antara ac dan non ac dimana perbedaannya terletak pada perpindahan panas dan perpindahan massa. Dengan memakai ac maka laju perpindahan panas dan perpindahan massa akan lebih cepat daripada non ac.

BAB IV

ANALISA DATA

4.1 Analisa Grafik

Data-data hasil perhitungan yang telah didapatkan dengan menggunakan contoh perhitungan pada bab 3 sebelumnya akan digunakan untuk membantu proses analisa mengenai proses perpindahan panas (*heat transfer*) dan perpindahan massa (*mass transfer*). Grafik yang ditampilkan pada bab ini merupakan perbandingan nilai bilangan Sherwood dan nilai bilangan Nusselt yang dihitung dengan menggunakan ketiga metode perhitungan yaitu : metode model film stagnan, model pendekatan baru terhadap film stagnan, dan model analogi Ranz-Marshall.

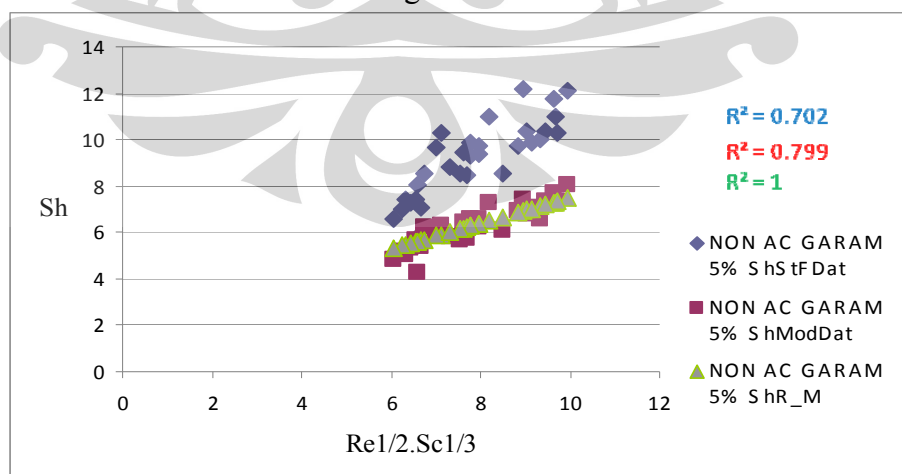
Analisa grafik pada bab ini terdiri dari 3 subbab yaitu grafik perbandingan antar model yaitu grafik Sherwood dan Nusselt dari cairan garam 5% dan aquades baik yang ac maupun non ac. Subbab ke 2 yaitu perbandingan grafik pengaruh kelembaban antara yang ac dan non ac. Subbab ke 3 yaitu perbandingan grafik pengaruh konsentrasi antara larutan garam 5% dengan cairan aquades murni.

4.2 Analisa Grafik Perbandingan Antar Model

4.2.1 Grafik Sherwood

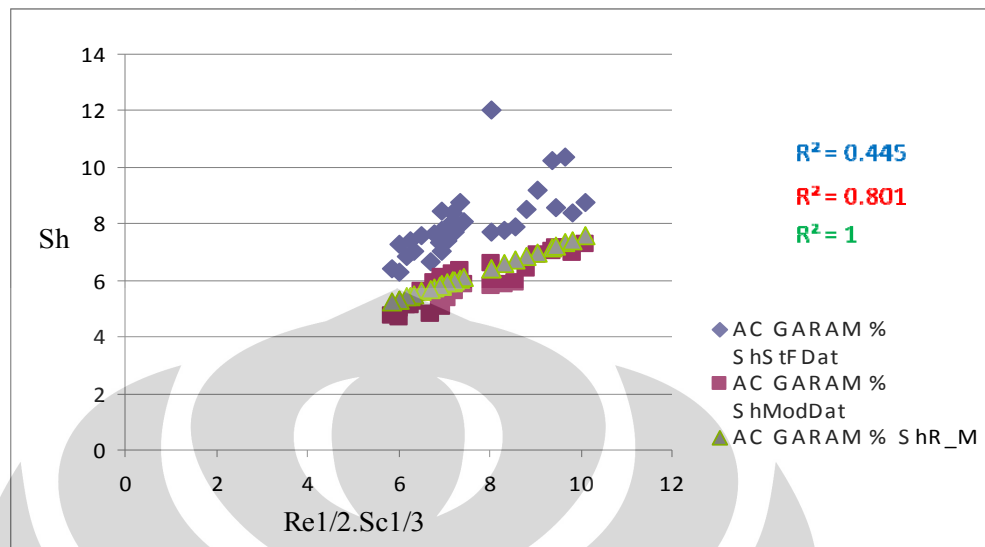
Berikut adalah hasil grafik untuk bilangan Sherwood :

1. Grafik Sherwood untuk non ac garam 5%



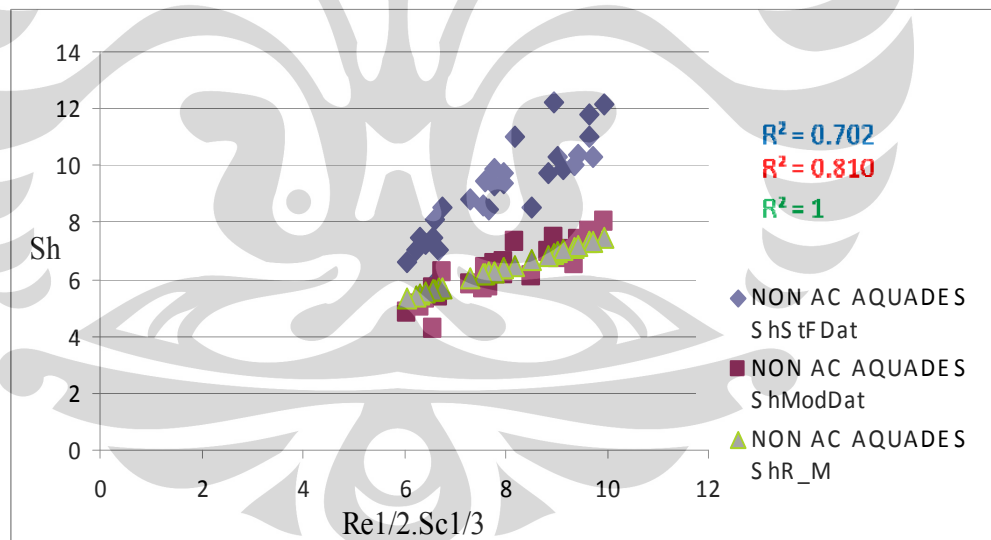
Gambar 4.1 Grafik Sherwood non AC garam 5%

2. Grafik Sherwood untuk ac garam 5%



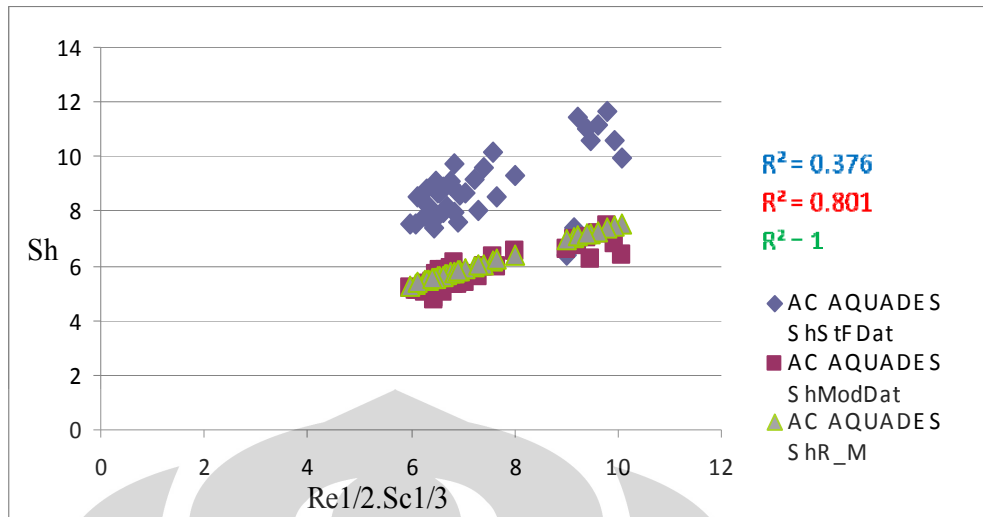
Gambar 4.2 Grafik Sherwood AC garam 5%

3. Grafik Sherwood untuk non ac aquades



Gambar 4.3 Grafik Sherwood non AC aquades

4. Grafik Sherwood untuk ac aquades



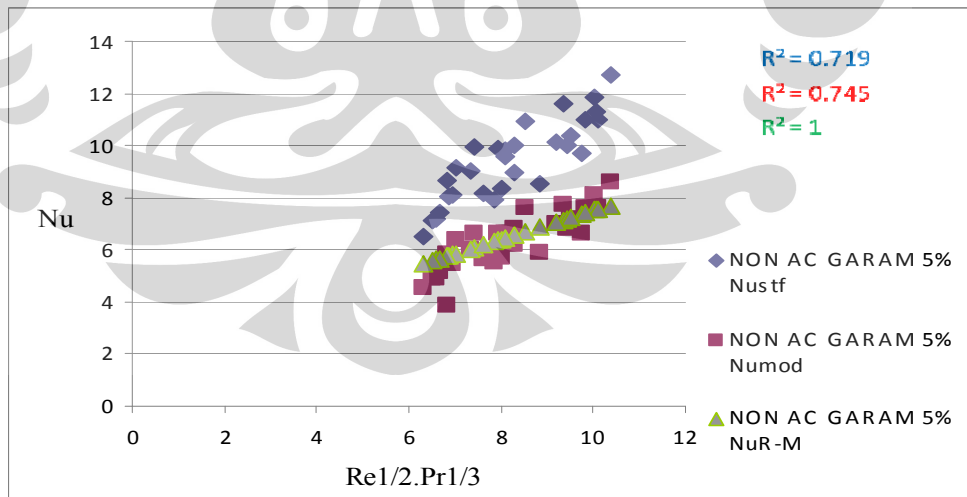
Gambar 4.4 Grafik Sherwood AC aquades

Pada grafik di atas terlihat bahwa grafik Sherwood stagnan film berada di atas grafik Sherwood Ranz-Marshall. Hal ini menunjukkan korelasi yang lemah terhadap analogi Ranz-Marshall. Sebaliknya Sherwood model pendekatan baru (Kosasih E.A 2006) menunjukkan korelasi yang dekat dengan analogi Ranz-Marshall.

4.2.2 Grafik Nusselt

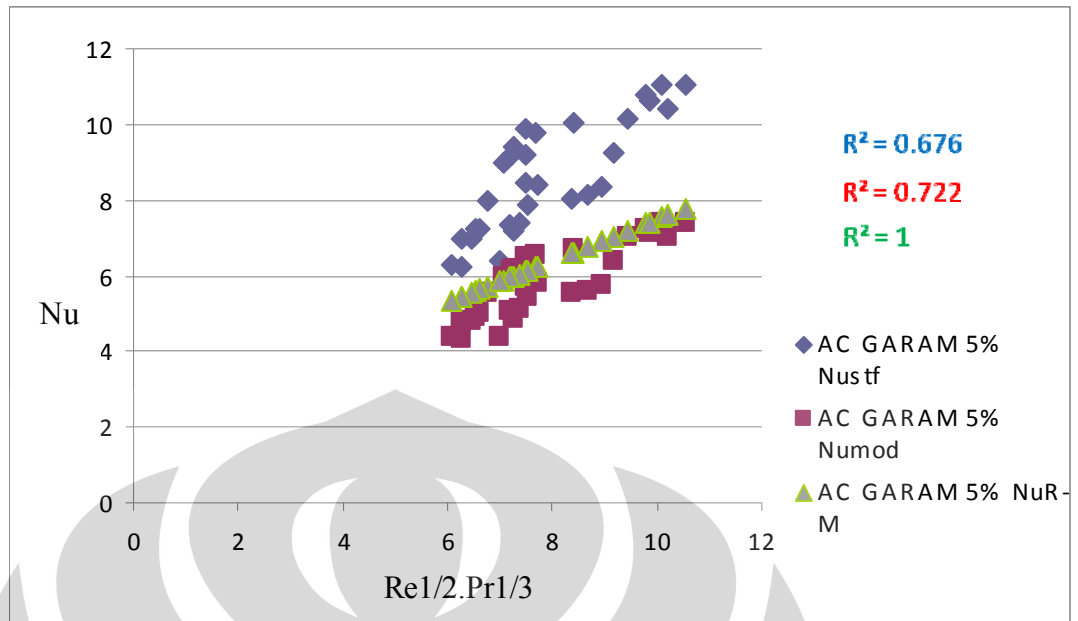
Berikut adalah hasil grafik untuk bilangan Nusselt :

1. Grafik Nusselt untuk non ac garam 5%



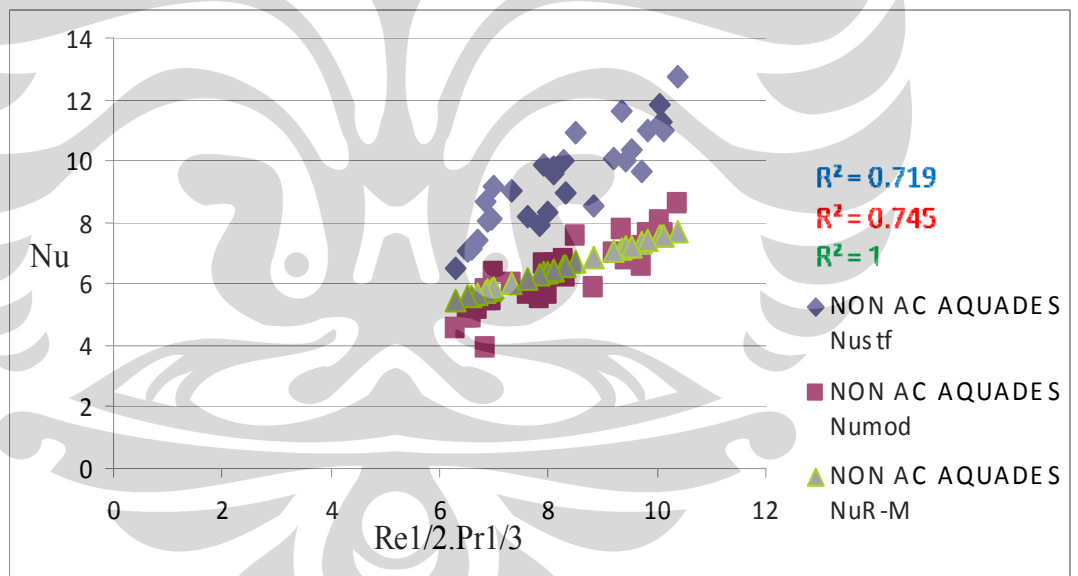
Gambar 4.5 Grafik Nusselt non AC garam 5%

2. Grafik Nusselt untuk ac garam 5%



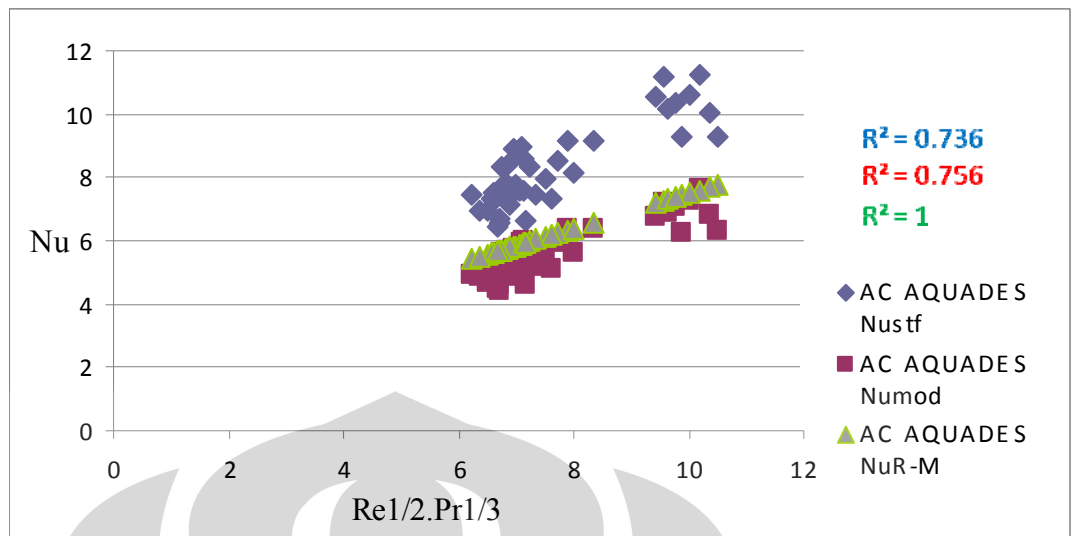
Gambar 4.6 Grafik Nusselt untuk AC garam 5%

3. Grafik Nusselt untuk non ac aquades



Gambar 4.7 Grafik Nusselt non AC aquades

4. Grafik Nusselt untuk ac aquades



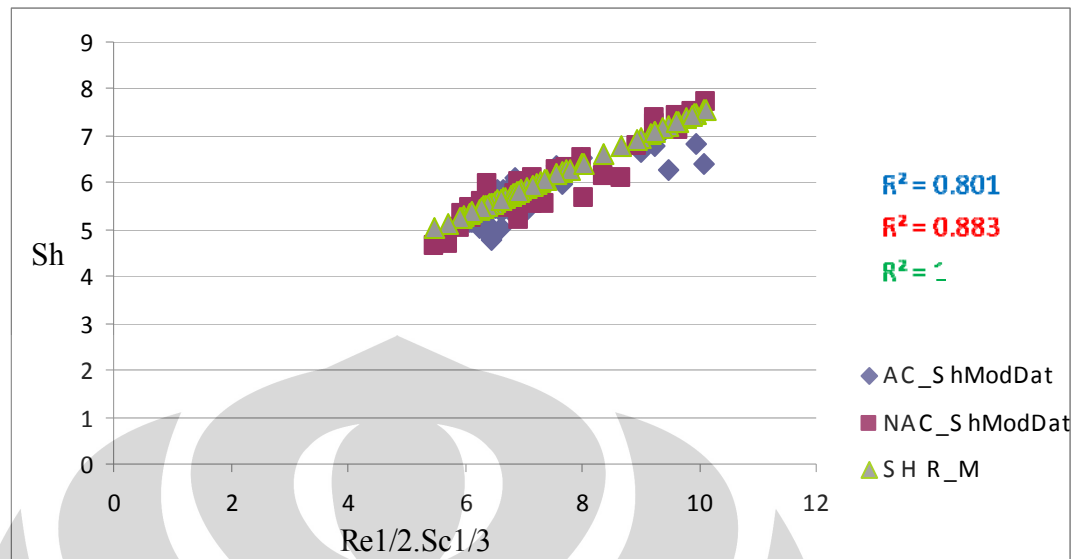
Gambar 4.8 Grafik Nusselt ac aquades

Grafik Nusselt diatas menunjukkan bahwa data hasil perhitungan dengan menggunakan metode pendekatan baru (Kosasih E.A 2006) berada dekat dengan analogi Ranz-Marshall dan model stagnan film berada jauh dari analogi Ranz-Marshall. Hal ini merupakan pembuktian bahwa metode perhitungan yang menggunakan pendekatan baru terhadap *stagnant film model* mempunyai korelasi yang kuat terhadap Ranz-Marshall dibanding model stagnan film.

4.3 Analisa grafik perbandingan kelembaban yaitu ac dan non ac.

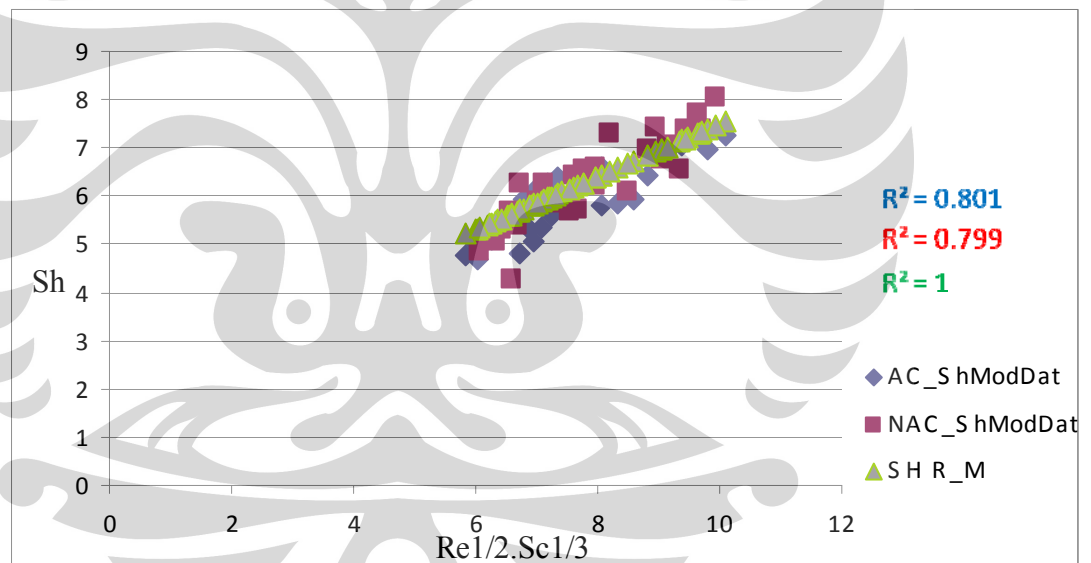
4.3.1 Grafik Sherwood

1. Aquades



Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Sh Aquades pada kondisi AC vs Non AC

2. Garam 5%

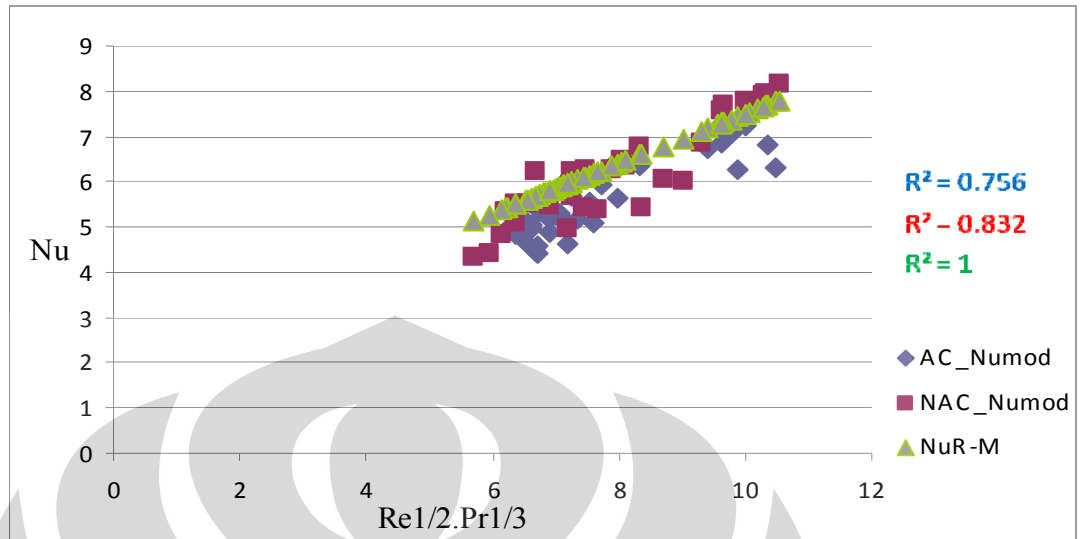


Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Sh Garam pada kondisi AC vs Non AC

Pada perbandingan kelembaban nilai Sherwood antara yang ac dan non ac tidak terlalu terlihat perbedaan yang signifikan. Namun berdasarkan perhitungan pada bab 3 terdapat perbedaan yaitu laju penguapan dengan kelembaban ac jauh lebih cepat dibandingkan dengan non ac. Nilai yang membedakan kelembaban tersebut adalah N_{AO} (laju perpindahan massa) dan q_0 (laju perpindahan panas). Pengaruh kelembaban antara ac dan non ac akan terlihat berbeda di fraksi mol uap pada lingkungan (X_{inf}).

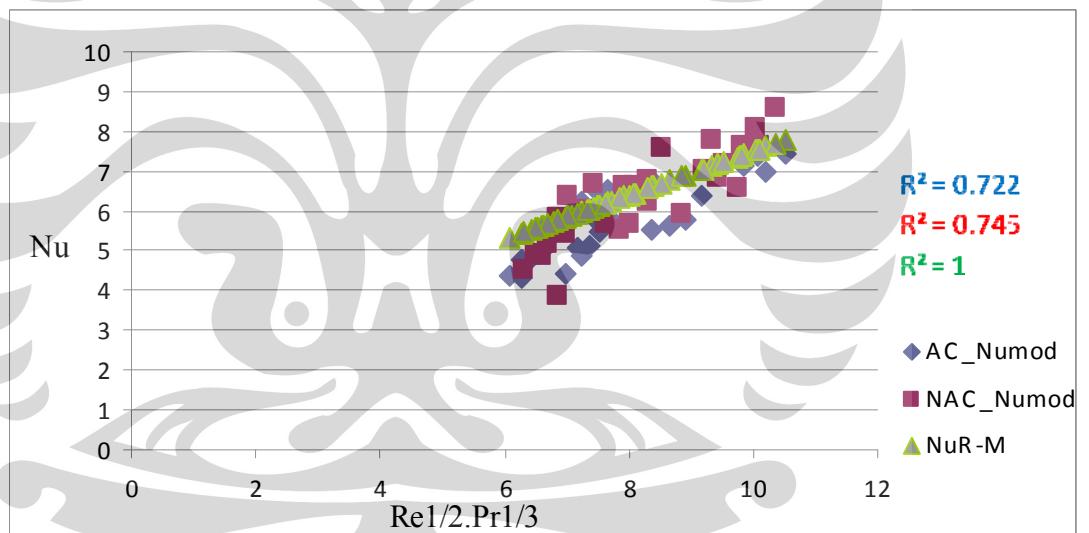
4.3.2 Grafik Nusselt

1. Aquades



Gambar 4.11 Grafik Perbandingan Nu Aquades pada kondisi AC vs Non AC

2. Garam 5%



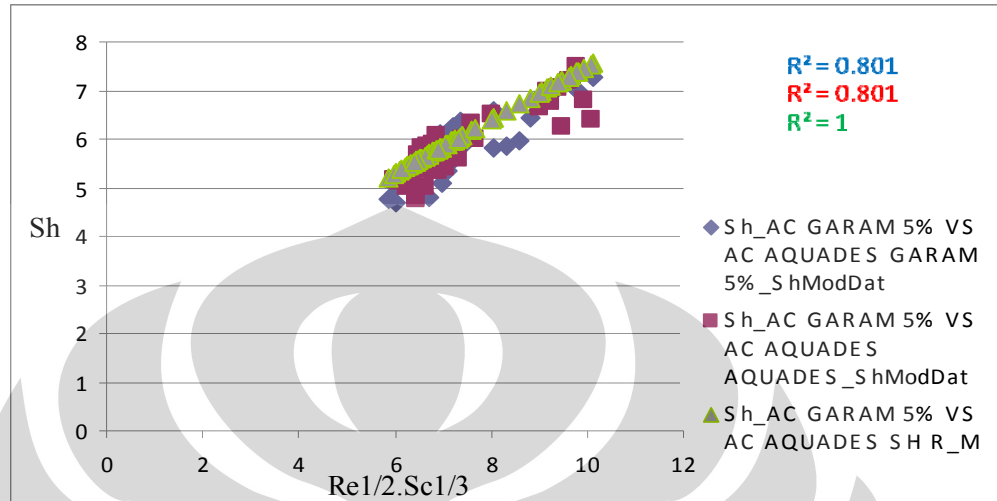
Gambar 4.12 Grafik Perbandingan Nu Garam 5% pada kondisi AC vs Non AC

Pada perbandingan kelembaban terlihat pada grafik bahwa nilai Nusselt antara yang ac dan non ac tidak terlalu terlihat perbedaan yang signifikan. Namun berdasarkan perhitungan pada bab 3 terdapat perbedaan yang cukup signifikan yaitu laju penguapan dengan kelembaban ac jauh lebih cepat dibandingkan dengan non ac. Nilai yang membedakan kelembaban tersebut adalah N_{AO} (laju perpindahan massa) dan q_0 (laju perpindahan panas). Pengaruh kelembaban akan terlihat berbeda di fraksi mol uap pada lingkungan (X_{inf}).

4.4 Analisa perbandingan pengaruh konsentrasi garam 5% dengan aquades

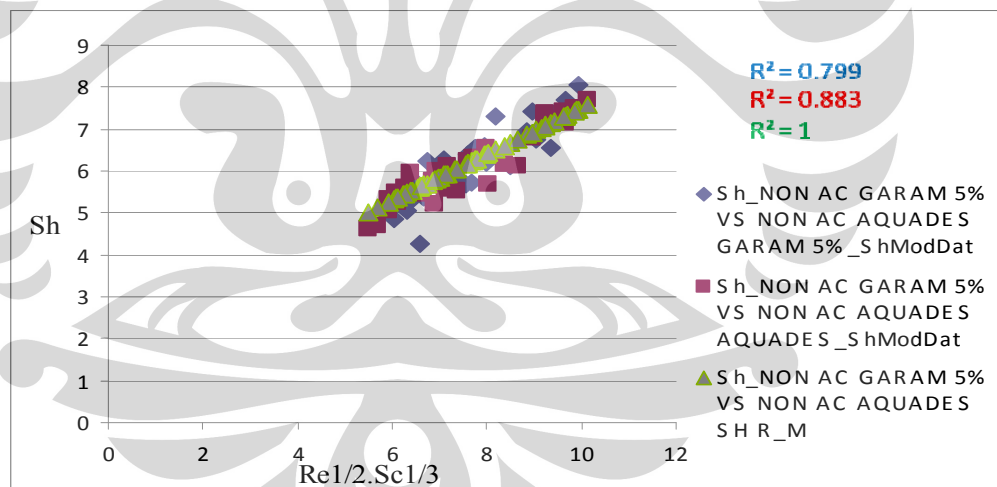
4.4.1 Grafik Sherwood

1. AC Aquades vs AC Garam 5%



Gambar 4.13 Grafik Sh Perbandingan Konsentrasi antara Aquades AC vs Garam 5 % AC

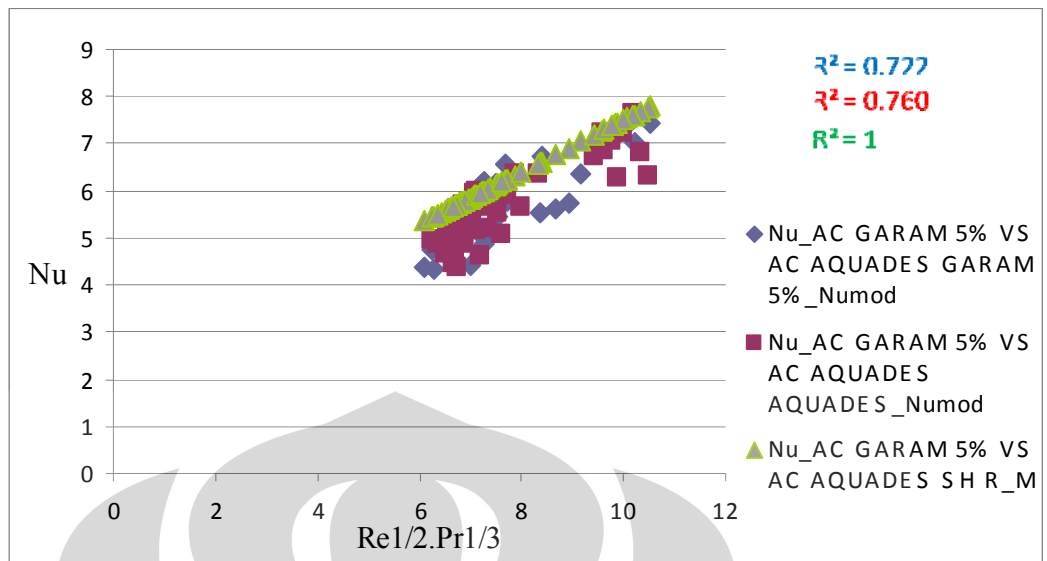
2. Non AC Aquades vs Non AC Garam 5%



Gambar 4.14 Grafik Sh Perbandingan Konsentrasi antara Aquades Non AC vs Garam 5% Non AC

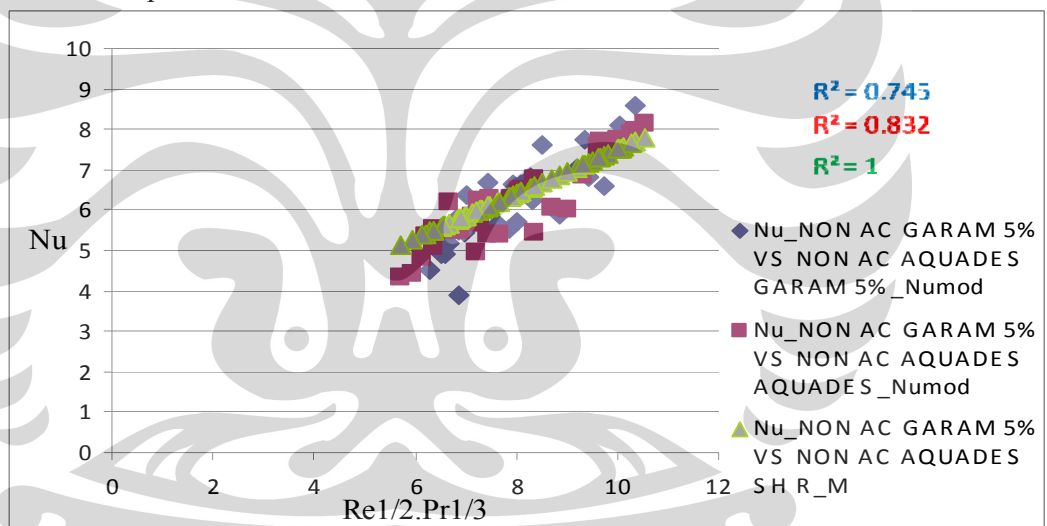
4.4.2 Grafik Nusselt

1. AC Aquades vs AC Garam 5%



Gambar 4.15 Grafik Nu Perbandingan Konsentrasi antara Aquades AC vs Garam 5 % AC

2. Non AC Aquades vs Non AC Garam 5%



Gambar 4.16 Grafik Nu Perbandingan Konsentrasi antara Aquades AC vs Garam 5 % AC

Baik grafik Sherwood maupun grafik Nusselt diatas telah menunjukkan korelasi yang dekat dengan analogi Ranz-Marshall dan tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Hal ini berarti pengaruh konsentrasi tidak terlalu berpengaruh terhadap peluruhan droplet. Perbedaan antara aquades dengan garam 5% berpengaruh pada penurunan uap jenuh.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Nilai bilangan Le (Lewis) mempunyai persyaratan = 1, tetapi dari perhitungan yang didapat ternyata < 1 yaitu $Le = 0,87 - 0,88$.
2. Pengaruh kelembaban yang diberikan terhadap udara yang mengalir di dalam sistem akan berpengaruh terhadap nilai X_{inf} .
3. Pengaruh konsentrasi akan berpengaruh terhadap nilai dari tekanan uap jenuh.
4. Semakin tinggi frekuensi laju aliran maka nilai bilangan Reynolds akan semakin meningkat juga.
5. Dengan membandingkan ketiga metode perhitungan ternyata didapatkan bahwa pendekatan model baru pada model film stagnan (E. A. Kosasih, 2006) lebih dekat nilainya dengan eksperimen Ranz-Marshall.
6. Pada temperatur konstan, dengan adanya peningkatan kecepatan aliran maka laju perpindahan panas dan massa akan meningkat juga.
7. Pada kecepatan aliran yang konstan, dengan adanya peningkatan temperatur maka laju perpindahan panas dan massa akan meningkat juga.
8. Penggunaan ac akan mempercepat laju perpindahan panas dan perpindahan massa dibanding non ac.

5.2 Saran

1. Proses pengambilan gambar tetesan sebaiknya dilakukan dengan menggunakan *high speed digital camera*.
2. Menggunakan metode yang tepat dalam proses pengukuran tetesan, seperti pengukuran menggunakan *pixel* dan acuan kalibrasi skala yang tepat.
3. Dibutuhkan alat ukur kecepatan yang mampu bekerja pada temperatur yang tinggi.

DAFTAR ACUAN

- [1] J.P.Holman, *Perpindahan Kalor*, terj.E.Jasjfi (Jakarta: Erlangga, 1991)
hal 201.
- [2] J.P.Holman, *Perpindahan Kalor*, terj.E.Jasjfi (Jakarta: Erlangga, 1991)
hal 194.
- [3] J.P.Holman, *Perpindahan Kalor*, terj.E.Jasjfi (Jakarta: Erlangga, 1991)
hal 213.
- [4] J.P.Holman, *Perpindahan Kalor*, terj.E.Jasjfi (Jakarta: Erlangga, 1991)
hal 541.
- [5] Engkos A Kosasih, “Perpindahan Panas dan Massa Dalam Proses Penguapan Tetesan : Suatu Pendekatan Baru pada Model Film Stagnan”, *Sinopsis Disertasi*, Program Pasca Sarjana Bidang Ilmu Teknik, Fakultas Teknik UI, Depok, 2006, hal 5.
- [6] Engkos A Kosasih, “Perpindahan Panas dan Massa Dalam Proses Penguapan Tetesan : Suatu Pendekatan Baru pada Model Film Stagnan”, *Sinopsis Disertasi*, Program Pasca Sarjana Bidang Ilmu Teknik, Fakultas Teknik UI, Depok, 2006, hal 6.
- [7] Engkos A Kosasih, “Perpindahan Panas dan Massa Dalam Proses Penguapan Tetesan : Suatu Pendekatan Baru pada Model Film Stagnan”, *Sinopsis Disertasi*, Program Pasca Sarjana Bidang Ilmu Teknik, Fakultas Teknik UI, Depok, 2006, hal 13.

- [8] Henry Nasution, *Bab II Psikometrik*, hal 1. Diakses 21 Mei 2007, dari www.he4si.com/Pendingin/BAB2.pdf.
- [9] William C. Reynolds, Henry Perkins, *Termodinamika Teknik*, terj.Filino Harahap (Jakarta: Erlangga, 1991) hal 40.
- [10] William C. Reynolds, Henry Perkins, *Termodinamika Teknik*, terj.Filino Harahap (Jakarta: Erlangga, 1991) hal 356.
- [11] William C. Reynolds, Henry Perkins, *Termodinamika Teknik*, terj.Filino Harahap (Jakarta: Erlangga, 1991) hal 86.
- [12] J.P.Holman, *Perpindahan Kalor*, terj.E.Jasjfi (Jakarta: Erlangga, 1991) hal 11.
- [13] J.P.Holman, *Perpindahan Kalor*, terj.E.Jasjfi (Jakarta: Erlangga, 1991) hal 13.
- [14] Engkos A Kosasih, “Perpindahan Panas dan Massa Dalam Proses Penguapan Tetesan : Suatu Pendekatan Baru pada Model Film Stagnan”, *Sinopsis Disertasi*, Program Pasca Sarjana Bidang Ilmu Teknik, Fakultas Teknik UI, Depok, 2006, hal 17.
- [15] J.P.Holman, *Perpindahan Kalor*, terj.E.Jasjfi (Jakarta: Erlangga, 1991) hal 539.
- [16] J.P.Holman, *Perpindahan Kalor*, terj.E.Jasjfi (Jakarta: Erlangga, 1991) hal 534.
- [17] Engkos A Kosasih, “Perpindahan Panas dan Massa Dalam Proses Penguapan Tetesan : Suatu Pendekatan Baru pada Model Film Stagnan”, *Sinopsis Disertasi*,

Program Pasca Sarjana Bidang Ilmu Teknik, Fakultas Teknik UI, Depok, 2006,
hal 16.



DAFTAR PUSTAKA

- Bennett C.O., Myers J.E. *Momentum, Heat and Mass Transfer*, (New York: McGraw Hill, 1982)
- Cengel, Yunus A., Michael A.Boles, *Thermodynamics An Engineering Approach*, (New York : McGraw Hill, 1994)
- “Garam (kimia)”. [http://id.wikipedia.org/wiki/Garam_\(kimia\)](http://id.wikipedia.org/wiki/Garam_(kimia)). Diakses tanggal 5 Juni 2009.
- Henry Nasution, *Bab II Psikometrik*, hal 1. Diakses 1 Juni 2009, dari www.he4si.com/Pendingin/BAB2.pdf
- Holman, J.P., *Experimental Methods for Engineers*, (Singapore : McGraw Hill, 2001)
- Holman , J.P., *Perpindahan Kalor*, terj.E.Jasjfi (Jakarta: Erlangga, 1991).
- Incropera, Frank P., David P. De Witt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, (New York: John Wiley & Sons, 1996).
- Kosasih, EA., “Perpindahan Panas dan Massa Dalam Proses Penguapan Tetesan : Suatu Pendekatan Baru pada Model Film Stagnan”, Sinopsis Disertasi, Program Pasca Sarjana Bidang Ilmu Teknik, Fakultas Teknik UI, Depok, 2006
- Reynolds, William C., Henry Perkins, *Termodinamika Teknik*, terj.Filino Harahap (Jakarta: Erlangga, 1991).
- Supriyono, SP.“Mengukur Faktor-Faktor dalam Proses Pengeringan”. Diakses tanggal 1 Juni 2009

http://id.kambing.ui.edu/.../mengukur_faktor_faktor_proses_dlm_pengeringan.pdf.

Temokopel". <http://id.wikipedia.org/wiki/Termokopel>. Diakses tanggal 1 Juni 2009.

