



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**Penguapan Tetesan Pertamax :  
Perbandingan antara Model Film Stagnan  
dan Model Modifikasi**

**AHMAD HAUDI  
0906604653**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JULI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**Penguapan Tetesan Pertamax :  
Perbandingan antara Model Film Stagnan  
dan Model Modifikasi**

**SKRIPSI**

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

**AHMAD HAUDI**

**0906604653**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JULI 2012**

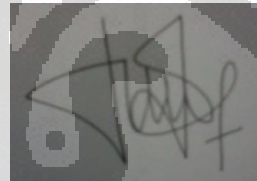
## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Ahmad Haudi**

**NPM : 0906604653**

**Tanda Tangan :**



**Tanggal : 16 Juli 2012**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Ahmad Haudi  
NPM : 0906604653  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : **Penguapan Tetesan Pertamax :  
Perbandingan antara Model Film  
Stagnan dan Model Modifikasi**

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. Ir. Imansyah Ibnu Hakim, M.Eng (.....)

Penguji : Ir. Warjito M.Sc., Ph.D (.....)

Penguji : Dr. Ir. Ahmad Indra Siswantara (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 16 Juli 2012

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan YME, karena atas berkat dan anugerah-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, skripsi yang saya tulis ini bukan merupakan suatu yang *instant*. Itu buah dari suatu proses yang relatif panjang, menyita segenap tenaga dan pikiran. Yang pasti, tanpa segenap motivasi, kesabaran, kerja keras, dan do'a – mustahil saya sanggup untuk menjalani tahap demi tahap dalam kehidupan akademik saya di Teknik Mesin-UI, 3 (tiga) tahun lamanya. 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 Tuhan YME senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah pada kita semua. Amin.

Depok, Juli 2012

Penulis

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

---

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

Nama : Ahmad Haudi  
NPM : 0906604653  
Program Studi : Teknik Mesin  
Departemen : 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 :

**Penguapan Tetesan Pertamax : Perbandingan antara Model  
Film Stagnan dan Model Modifikasi**

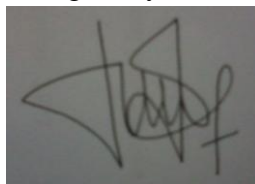
Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 16 Juli 2012

Yang menyatakan



( Ahmad Haudi)

## ABSTRAK

Ahmad Haudi  
NPM 0906604653  
Departemen Teknik Mesin

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

### Penguapan Tetesan Pertamax : Perbandingan antara Model Film Stagnan dan Model Modifikasi

#### ABSTRAK

Penelitian laju penguapan pada tetesan bahan bakar sangat penting untuk meningkatkan efisiensi pada proses pembakaran. Pada saat ini perhitungan nilai laju penguapan banyak menggunakan metode analogi Ranz W E & Marshall W R dan analogi Film stagnan. Dan beberapa software simulasi combustion, yaitu Fluent dan DNS juga menggunakan kedua analogi tersebut, dengan menggunakan hubungan perpindahan kalor dan massa dan memanfaatkan hubungan similaritas antara bilangan Sherwood dan bilangan Nusselt. Penelitian ini ditujukan untuk mengetahui apakah model analogi ini dapat digunakan pada tetesan pertamax yang memiliki bilangan Lewis 3 – 4 dan membandingkan dengan model modifikasi (E. A. Kosasih). Metode penelitian ini menggunakan jarum suntik untuk membuat tetesan bahan bakar yang diletakkan pada termokopel. Kemudian dialirkan udara dengan variasi kecepatan pada temperatur 50 °C, 75 °C dan 100 °C. Nilai bilangan Sherwood dan Nusselt model Modifikasi oleh E. A. Kosasih ternyata mempunyai korelasi yang lebih kuat dibandingkan dengan model film stagnan.

**Kata Kunci : Penguapan tetesan; Analogi Ranz-Marshall; Model film stagnan; Pendekatan baru model film stagnan (E. A. Kosasih, 2006)**

## ABSTRACT

Ahmad Haudi  
NPM 0906604653  
Departemen Teknik Mesin

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

### **Pertamax Droplet Evaporation : A Comparison between Stagnant Film Model and Modified Model**

#### **ABSTRACT**

*Research of evaporation rate of fuel droplet is very important to improve efficiency of combustion process. In this era, calculation of evaporation rate usually use method of Ranz W E & Marshall W R analogy and stagnant film analogy. And several combustion simulation software like Fluent and DNS use the analogy both of them that using the relation of heat and mass transfer and similarity relation between Sherwood and Nusselt Number. This study aimed to see whether the analogy model can be used on pertamax droplet which has Lewis numbers 3 – 4 and compare with model modification (E.A Kosasih)[4]. This research is using a nozzle to results fuel droplet on thermocouple. Afterward the air is given with variations of velocity at temperature range 50 °C and 75 °C and 100 °C. The value of Sherwood and Nusselt number with modification model has stronger correlation than stagnant film model.*

**Keywords:** Evaporation of droplets; analogy Ranz-**Marshall**; stagnant film model; new approach stagnant film model (**EA** Kosasih, 2006)

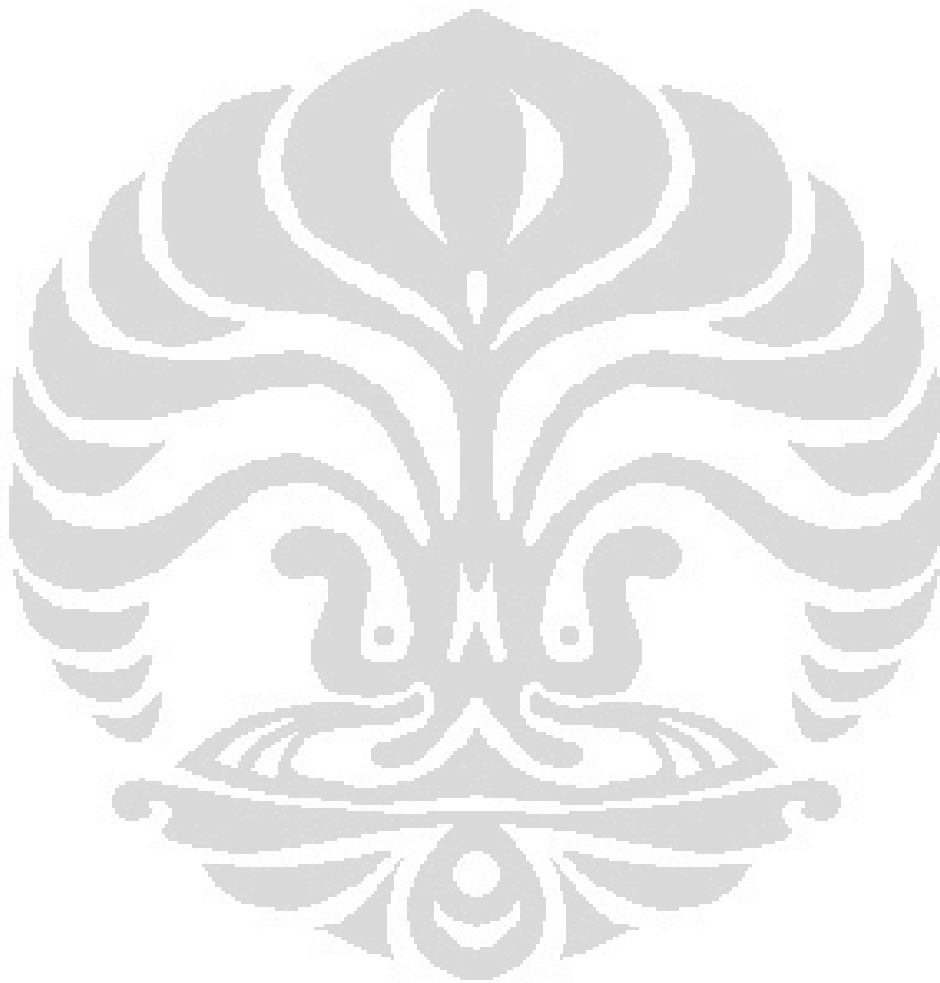


## DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI .....	v
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS .....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xiii
DAFTAR NOTASI .....	xiv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 LATAR BELAKANG .....	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH .....	1
1.3 TUJUAN PENELITIAN .....	2
1.4 BATASAN MASALAH .....	2
1.5 METODOLOGI PENELITIAN .....	2
1.6 SISTEMATIKA PENULISAN .....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	4
2.1 PRINSIP DASAR .....	4
2.2 PERPINDAHAN MASSA .....	4
2.2.1 Koefisien Perpindahan Massa .....	4
2.2.2 Difusi Dalam Gas .....	5
2.2.3 Fluks Perpindahan Massa (Rx) .....	5
2.3 PERPINDAHAN KALOR .....	6
2.3.1 Konveksi .....	6
2.3.2 Konduksi .....	6
2.3.3 Radiasi .....	7
2.3.4 Fluks Perpindahan Panas .....	7
2.3.5 Kalor Laten Penguapan .....	7

2.4 KARAKTERISTIK UDARA.....	8
2.5 BILANGAN TAK BERDIMENSI .....	10
2.5.1 Bilangan Reynolds .....	10
2.5.2 Bilangan Schmidt .....	11
2.5.3 Bilangan Prandtl.....	11
2.5.4 Bilangan Nusselt .....	12
2.5.5 Bilangan Sherwood .....	12
2.6.6 Bilangan Lewis.....	12
2.6 PERSAMAAN RANZ – MARSHALL .....	12
2.7 MODEL ANALOGI FILM STAGNAN.....	13
2.7.1 Bilangan Nusselt Model Analogi Film stagnan .....	14
2.7.2 Sherwood Model Film stagnan ( $Sh_{sF}$ ).....	14
2.8 MODEL ANALOGI PENDEKATAN BARU FILM STAGNAN .....	15
2.8.1 Sherwood Model Pendekatan Baru ( $Sh_{Mod}$ ).....	15
2.8.2 Bilangan Nusselt Model Pendekatan Baru.....	16
BAB III METODE PENELITIAN .....	17
3.1 KOMPONEN SISTEM.....	17
3.1.1 Heater .....	17
3.1.2 Blower .....	18
3.1.3 Pyrex.....	18
3.1.4 Digital Controller .....	19
3.1.5 Temperature Display.....	20
3.1.6 Alat Suntik.....	20
3.1.7 Inverter .....	20
3.2 PROSEDUR KALIBRASI DAN PENGAMBILAN DATA.....	21
3.2.1 Pengambilan Data .....	21
3.2.2 Kalibrasi Jarum Suntik .....	23
3.3 PENGOLAHAN DATA .....	24
3.3.1 Pengolahan Data Foto .....	24
3.3.2 Pengolahan Data Kecepatan.....	25
3.3.3 Contoh Perhitungan.....	27
BAB IV HASIL DAN ANALISA .....	37

4.1 ANALISA PERBANDINGAN NILAI SHERWOOD ANTAR MODEL .....	37
4.2 ANALISA PERBANDINGAN NILAI NUSSELT ANTAR MODEL .....	40
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	43
5.1 KESIMPULAN .....	43
5.2 SARAN .....	43
DAFTAR PUSTAKA .....	44
LAMPIRAN .....	45

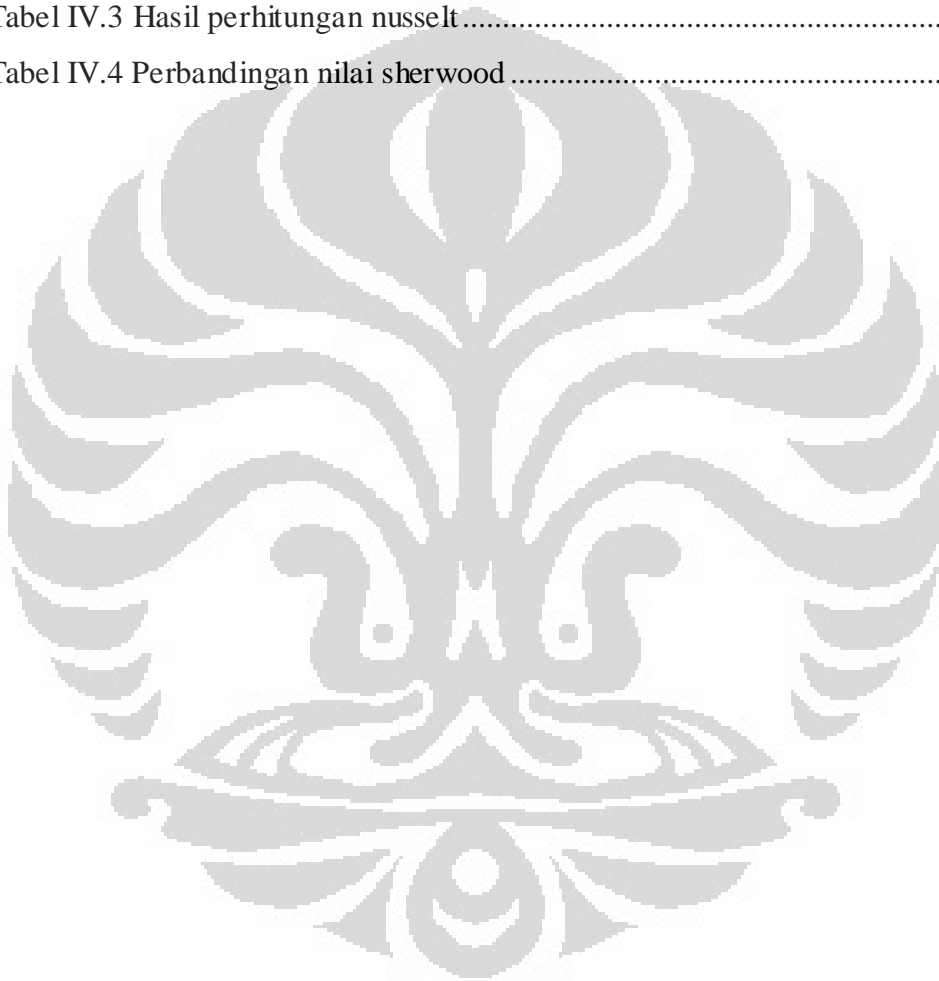


## DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1 Model Film Stagnan .....	13
Gambar III.1 Skema sistem pengujian .....	17
Gambar III.2 Heater .....	18
Gambar III.3 Blower .....	18
Gambar III.4 Pyrex.....	19
Gambar III.5 Digital Controller .....	19
Gambar III.6 Skema Auto Tunning.....	19
Gambar III.7 Temperature Display .....	20
Gambar III.8 Alat Suntik.....	20
Gambar III.9 Display Inverter ST200 .....	21
Gambar III.10 Posisi Jarum dan Tetesan .....	22
Gambar III.11 Panel Sistem Listrik.....	22
Gambar III.12 Tetesan.....	23
Gambar III.13 Pengolahan Data Tetesan .....	24
Gambar III.14 Rangkaian Baterai .....	25
Gambar III.15 High Speed Camera.....	26
Gambar III.16 Kawat Tembaga.....	26
Gambar IV.1 Perbandingan Bilangan Sherwood antar Model pada Pertamax(a).37	
Gambar IV.2 Perbandingan Bilangan Sherwood antar Model pada Pertamax(b).37	
Gambar IV.3 Perbandingan Bilangan Sherwood antar Model pada Pertamax(c).38	
Gambar IV.4 Perbandingan Bilangan Nusselt antar Model pada Pertamax (a)....	40
Gambar IV.5 Perbandingan Bilangan Nusselt antar Model pada Pertamax (b)....	40
Gambar IV.6 Perbandingan Bilangan Nusselt antar Model pada Pertamax (c)....	41

## DAFTAR TABEL

Tabel II.1 Kondisi Aliran Fluida .....	23
Tabel III.1 Data Experimen (tetesan) .....	24
Tabel III.2 Data Kecepatan Aliran Udara Pipa (kecepatan asap) .....	27
Tabel IV.1 Hasil perhitungan sherwood .....	38
Tabel IV.2 Perbandingan nilai sherwood .....	39
Tabel IV.3 Hasil perhitungan nusselt .....	41
Tabel IV.4 Perbandingan nilai sherwood .....	42



## DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1 TABEL SIFAT UDARA PADA TEKANAN ATMOSFER .....	45
LAMPIRAN 2 TABEL EMISSIVITAS PERMUKAAN .....	46
LAMPIRAN 3 TABEL PROPERTIES.....	47
LAMPIRAN 4 TABEL PROPERTIES-2 .....	48
LAMPIRAN 5 TABEL PROPERTIES-3 .....	49



## DAFTAR NOTASI

Simbol	Keterangan	Dimensi
$h$	Entalpi udara basah	[KJ/kg]
$h_{da}$	Entalpi udara kering	[KJ/kg]
$h_w$	Entalpi uap air	[KJ/kg]
$h_f$	Entalpi spesifik fasa fluida	[KJ/Kg]
$h_g$	Entalpi spesifik fasa uap	[KJ/Kg]
$h_{fg}$	Selisih entalpi spesifik fasa fluida dan uap	[KJ/Kg]
$\rho$	Massa jenis	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$g$	Percepatan gravitasi	[m/s <sup>2</sup> ]
$P$	Tekanan atmosfer udara basah	[Pa]
$V$	Volume udara basah	[m <sup>3</sup> ]
$m$	Massa udara basah	[Kg]
$R_a$	Konstanta gas	[KJ/kg.K]
$T$	Temperatur udara	[K]
$T_s$	Temperatur permukaan	[°C]
$T_\infty$	Temperatur ambien	[°C]
$m_{da}$	Massa udara kering	[Kg]
$m_v$	Massa uap air	[Kg]
$n$	Mole udara basah	[K mole]
$n_{da}$	Mole udara kering	[K mole]
$n_v$	Mole uap air	[K mole]
$P_t$	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/K.g.K]
$R_v$	Tetapan gas untuk uap air = 461,5	[J/K.g.K]
$q$	Laju perpindahan kalor	[KJ/s]
$k$	Konduktivitas termal	[W/m.°C]

$A$	Luas penampang	$[m^2]$
$\sigma$	Konstanta stefant boltzman	$[W/m^2 K^4]$
$T_u$	Temperatur sumber radiasi	$[K]$
$T_d$	Temperatur <i>droplet</i>	$[K]$
$Q_{konveksi}$	Radiasi	$[Watt]$
$m$	Fluks massa difusi komponen A	$[Kg/s]$
$k_c$	Koefisien konveksi massa	$[m/s]$
$\rho_s$	Berat jenis uap pada permukaan	$[Kg/m^3]$
$\rho_\infty$	Berat jenis invinite	$[Kg/m^3]$
$D$	Difusivitas	$[m^2/s]$
$d$	Diameter dalam lapisan air	$[m]$
$\tau$	Tegangan geser	$[N/m^2]$
$\mu$	Viskositas dinamik	$[Ns/m^2]$
$u$	Kecepatan fluida	$[m/s]$
$P_c$	Tekanan Kritis	$[bar]$
$T_c$	Temperatur kritis	$[K]$
$T_{br}$	perbandingan temperatur boiling dengan kritis	$[K]$
$T_r$	perbandingan temperatur droplet dengan kritis	$[K]$
$\omega$	Faktor assentrik	
$Sh$	Bilangan Sherwood	
$Nu$	Bilangan Nusselt	
$Le$	Bilangan Lewis	
$Pr$	Bilangan Prandtl	



# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 LATAR BELAKANG

Pertamax adalah salah satu bahan bakar yang digunakan di Indonesia. Experimen proses pembakaran pada pertamax atau bahan bakar lainnya masih diteliti dan dikembangkan sampai saat ini untuk mendapatkan hasil yang sempurna. Proses pembakaran terjadi dari hasil penyalaan bahan bakar (*ignition*) dalam fasa uap yang tercampur dengan udara bertekanan tinggi. Bahan bakar akan cepat menguap pada ukuran *droplet* (tetesan) sehingga studi laju penguapan pada tetesan bahan bakar sangat penting untuk meningkatkan efisiensi pada proses pembakaran.

Pada saat ini perhitungan nilai laju penguapan banyak menggunakan metode analogi Ranz W E & Marshall W R dan analogi Film stagnan. Begitu juga pada salah satu *software* simulasi *combustion*, yaitu *Fluent* dan *DNS* yang menggunakan kedua analogi tersebut yang menggunakan hubungan perpindahan kalor dan massa dengan memanfaatkan hubungan similaritas antara bilangan Sherwood dan bilangan Nusselt.

Metode analogi Ranz-Marshall perlu diuji pada fluida bahan bakar, karena analogi ini mensyaratkan nilai bilangan Lewis bernilai satu. Sedangkan bahan bakar mempunyai bilangan Lewis sekitar tiga. E. A. Kosasih (2006) dalam disertasinya melakukan konfirmasi terhadap kedua analogi tersebut dengan menggunakan data hasil penelitian Walton (2004). Beliau menyimpulkan bahwa analogi Ranz-Marshall dan analogi Film stagnan memiliki perhitungan yang melenceng, maka E. A. Kosasih membuat analogi baru yang memasukkan faktor koreksi pada parameter perpindahan kalor dan massa.

## 1.2 PERUMUSAN MASALAH

Bahan bakar yang digunakan adalah pertamax yang diproduksi oleh Pertamina. Laju penguapan akan diuji dengan menggunakan tetesan dari bahan yang dipanaskan oleh udara dengan temperatur  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $75^{\circ}\text{C}$  dan  $100^{\circ}\text{C}$ . Penelitian ini juga menggunakan variasi flow yang diatur oleh inventer dengan variasi  $0,4\text{ m/s} - 2\text{ m/s}$ .

### 1.3 TUJUAN PENELITIAN

Meninjau hasil perhitungan model analogi Ranz-Marshall dan film stagnan untuk bahan uji pertamax yang memiliki bilangan Lewis sekitar 3-4. Kemudian membandingkannya dengan model analogi E. A. Kosasih yang digunakan pada penelitian ini.

### 1.4 BATASAN MASALAH

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

1. Fluida yang dipakai adalah pertamax,
2. Asumsi tetesan (*droplet*) yang terbentuk adalah berbentuk bola,
3. Diameter tetesan (*droplet*) yang digunakan berada pada nilai 1 - 3 mm,
4. Variasi temperatur adalah 50°C, 75°C dan 100°C,
5. Variasi kecepatan aliran 0,4 m/s – 2 m/s.

### 1.5 METODOLOGI PENELITIAN

Adapun tahapan-tahapan yang diambil dalam penelitian ini adalah :

#### 1. Studi Literatur

Sumber literatur yang digunakan sebagai acuan dalam pembuatan tugas akhir ini adalah buku, jurnal, artikel, skripsi, catatan dan melalui pengunduhan data dari internet.

#### 2. Alat uji

Merakit ulang alat uji E. A. Kosasih sedemikian rupa agar dapat memenuhi kebutuhan pengujian dan diharapkan dapat meningkatkan keakurasian data yang diambil dibandingkan dengan pengujian-pengujian yang telah dilakukan sebelumnya

#### 3. Pengambilan data

Tetesan difoto menggunakan kamera lensa makro Nikon D70 dengan jarak fokus 60mm, untuk selanjutnya dikalibrasi sehingga didapat data diameter tetesan. Data yang diambil berupa kecepatan aliran, suhu aliran, suhu tetesan dan foto dari tetesan dalam periode tertentu.

#### 4. Penyusunan laporan

Penyusunan laporan dilakukan seiring dengan tahapan-tahapan yang telah disebutkan sebelumnya.

### 1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Agar laporan tugas akhir ini memiliki struktur yang baik dan tujuan penulisan dapat tercapai dengan baik, maka penulisan tugas akhir ini akan mengikuti sistematika penulisan sebagai berikut :

#### BAB I PENDAHULUAN

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

#### BAB II DASAR TEORI

Bab ini membahas tentang konsep-konsep yang menjadi dasar teori dalam pengujian dan dasar teori untuk perhitungan.

#### BAB III METODE PENELITIAN.

Bab ini membahas mengenai prosedur pengambilan data meliputi kalibrasi, pengolahan data foto asap untuk mengetahui kecepatan aliran dan mengolahnya secara statistik serta pengolahan data foto tetesan sampai menghasilkan data dimensi tetesan dan contoh perhitungan data.

#### BAB IV ANALISA DATA

Bab ini membahas mengenai analisa data hasil pengujian sehingga diperoleh grafik laju penguapan tetesan pada berbagai variasi suhu dan kecepatan udara yang mengalir.

#### BAB V KESIMPULAN

Bab ini membahas mengenai kesimpulan yang didapatkan dari hasil pengujian dan saran penulis agar penelitian selanjutnya dapat menghasilkan data yang lebih akurat.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 PRINSIP DASAR

Proses *ignition* adalah suatu proses penyalaan yang dilakukan oleh busi (*spark plug*) yang akan menyulut uap dari bahan bakar yang digunakan. Proses pembakaran meliputi perpindahan kalor dan massa secara transien serta beberapa laju proses, seperti transformasi fisik atau kimia. Penelitian tentang pengukuran distribusi konsentrasi tekanan uap pada bahan bakar dalam fase gas dan *liquid* berguna untuk mengetahui distribusi konsentrasi tekanan uap didalam ruang bakar untuk dapat melihat distribusi laju penguapan.

Pada proses pembakaran, masuknya bahan bakar yang disemprotkan oleh *nozzle* akan masuk dalam bentuk droplet agar mudah untuk menguap dikarenakan yang akan terbakar lebih dahulu adalah bahan bakar yang berbentuk uap. *Droplet* yang sudah masuk ke ruang bakar akan menguap dan akan tersulut oleh api yang dihasilkan oleh *spark plug*. Hal yang harus diperhatikan agar mengetahui laju penguapan dengan model film stagnan E. A. Kosasih (E.A Kosasih) dengan acuan analogi Ranz-Marshall adalah perpindahan kalor dan perpindahan massa.

### 2.2 PERPINDAHAN MASSA

#### 2.2.1 Koefisien Perpindahan Massa

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

$$m = k_c A (\rho_s - \rho_\infty) \quad (2.1)$$

$$k_c = \frac{Sh \cdot D}{d} \quad (2.2)$$

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

$k_c$  = koefisien konveksi massa [m/s]

$\rho_s$  = berat jenis uap pada permukaan [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_\infty$  = berat jenis invinite [kg/m<sup>3</sup>]

$Sh$  = bilangan Sherwood

$D$  = difusivitas massa [m<sup>2</sup>/s]

$d$  = diameter dalam lapisan air [m]

$A$  = luas permukaan yang dibasahi air ( $\pi dL$ ) [m<sup>2</sup>]

### 2.2.2 Difusi Dalam Gas

Pada perhitungan difusi gas, rumus yang digunakan adalah rumus yang diusulkan oleh Fuller et al. :

$$D_{ab} = \frac{0,00143T^{1,75}}{PM_{ab}^{1/2}[(\sum_{va})^{1/3} + (\sum_{vb})^{1/3}]^2} \quad (2.3)$$

$P$  = tekanan kritis (bar)

$M_{ab}$  = berat molekul rata-rata (Kg/mol)

$\sum_v$  = nilai schoreder

$T$  = temperatur droplet (K)

Laju difusi molal :

$$N = \frac{\dot{m}}{M} \quad (2.4)$$

$$N = \frac{-dm/dt}{18.A} \quad (2.5)$$

Dimana  $\frac{-dm}{dt} = \rho \frac{-dV}{dt}$  (2.6)

Dan  $\frac{-dv}{dt} = Ax \frac{-dr}{dt}$  (2.7)

$N$  = laju difusi molal [mol/s]

$M$  = berat molekul [kg]

$\dot{m}$  = laju massa aliran (kg/s)

### 2.2.3 Fluks Perpindahan Massa (R<sub>x</sub>)

$$R_x = \frac{x_0 - x_{A\infty}}{1 - x_{A\infty}} \quad (2.8)$$

$R_x$  = fluks perpindahan massa.....

$x_0$  = fraksi mol uap pada permukaan droplet

$x_{A0}$  = fraksi mol uap pada lingkungan

## 2.3 PERPINDAHAN KALOR

### 2.3.1 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 [5]:

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.9)$$

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

$T_s$  = temperatur permukaan [ $^\circ\text{C}$ ]

$T_\infty$  = temperatur ambien [ $^\circ\text{C}$ ]

### 2.3.2 Konduksi

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

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.10)$$

Jika dimasukkan konstanta proporsionalitas maka persamaannya akan menjadi seperti berikut :

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.11)$$

$q$  = laju perpindahan kalor [ $\text{J}/\text{s}$ ]

$k$  = konduktivitas termal [ $\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ ]

$A$  = luas penampang [ $\text{m}^2$ ]

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

$x$  = jarak (panjang) perpindahan kalor [ $\text{m}$ ]

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

### 2.3.3 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 <sup>[5]</sup>:

$$\frac{Q}{A} = \alpha \sigma (T_u^4 - T_d^4) \quad (2.12)$$

$Q$  = radiasi [W]

$A$  = luas permukaan [ $m^2$ ]

$\alpha$  = absorptivitas

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

$T_u$  = temperatur sumber radiasi [K]

$T_d$  = temperatur *droplet* [K]

### 2.3.4 Fluks Perpindahan Panas

$$\phi = \frac{-N \times C_{pA}}{h_L} \quad (2.13)$$

$$C_{pA} = cp \times 28,9 \dots \dots \dots (2.14)$$

$R_T$  = fluks perpindahan panas

$\Phi$  = factor kecepatan perpindahan panas

$N$  = laju difusi molal [mol/s]

$h_L$  = koefisien perpindahan panas menuju nol

$C_{pA}$  = panas jenis molal udara [J/mol.K]

$cp$  = panas jenis udara [J/kg.°C]

### 2.3.5 Kalor Laten Penguapan

Kalor laten penguapan pada bahan bakar berbeda dengan kalor laten penguapan pada air, oleh karena itu akan digunakan rumus yang dihasilkan oleh Vetere yang memiliki error dibawah 2 %. Rumus kalor laten penguapan itu :

$$\Delta H_{vb} = RT_c T_{br} \frac{0.4343 \ln P_c - 0.69431 + 0.89584 T_{br}}{0.37691 - 0.37306 T_{br} + 0.15075 P_c^{-1} T_{br}^{-2}} \quad (2.15)$$

R = tetapan gas universal J/Kg K

T<sub>c</sub> = temperatur kritis (K)

T<sub>br</sub> = perbandingan T<sub>d</sub> dan T<sub>c</sub>

P<sub>c</sub> = tekanan kritis (Bar)

## 2.4 KARAKTERISTIK UDARA

Faktor yang sangat berperan penting dalam laju penguapan tetesan adalah udara. 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). Kandungan bahan bakar pada udara basah adalah 0.

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

Tetapan gas universal (℞) berdasarkan skala karbon-12 adalah :

$$\mathfrak{R} = 8.314,5 \text{ [J/(kmol.K)]} \quad (2.16)$$

Untuk tetapan gas tertentu (R<sub>i</sub>) dengan massa molekul relatif (M<sub>i</sub>) digunakan rumus :

$$R_i = \frac{\mathfrak{R}}{M_i} \quad (2.17)$$

Maka tetapan gas untuk udara kering (R<sub>da</sub>) berdasarkan skala karbon-12 adalah :

$$R_{da} = \frac{8314,41}{28,9} = 287,7 \text{ [J/kg.K]} \quad (2.18)$$

Dan tetapan gas untuk uap air (R<sub>v</sub>) berdasarkan skala karbon-12 adalah :

$$R_v = \frac{8314,41}{18} = 461,9 \text{ [J/kg.K]} \quad (2.19)$$



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

$$PV = mR_a T \quad (2.20)$$

$P$  = tekanan atmosfer udara basah [Pa]

$V$  = volume udara basah [ $m^3$ ]

$m$  = massa udara basah [kg]

$R_a$  = konstanta gas [kJ/kg.K]

$T$  = temperatur udara basah [K]

Tetapi untuk menghitung  $P_o$  pada bahan bakar maka saya menggunakan rumus yang direkomendasikan oleh lee dan kesler :

$$\ln P_{vp} = f^{(0)} T_r + \omega f^{(1)} T_r \quad (2.21)$$

$$f^{(0)} = 5,92714 - \frac{6,09648}{T_r} - 1,28862 \ln T_r + 0,16934 T_r^6 \quad (2.22)$$

$$f^{(1)} = 15,2518 - \frac{15,6875}{T_r} - 13,4721 \ln T_r + 0,43577 T_r^6 \quad (2.23)$$

$P_{vp}$  = Tekanan pada permukaan

$f^{(0)}$  dan  $f^{(1)}$  = fungsi penambah dari lee dan kessler

$\omega$  = *acentric factor*

Untuk menghitung *acentric* faktor ( $\omega$ ) maka rumus yang digunakan:

$$\omega = \frac{\alpha}{\beta} \quad (2.24)$$

$\alpha$  dan  $\beta$  = faktor korelasi dengan tekanan

Dimana  $\alpha$  dan  $\beta$  diperoleh dengan menghitung dengan rumus :

$$\alpha = -\ln P_c - 5,97214 + 6,09648 \theta^{-1} + 1,28861 \ln \theta - 0,169347 \theta^6 \quad (2.25)$$

$$\beta = 15,2518 - 15,6875 \theta^{-1} - 13,3721 \ln \theta - 0,43577 \theta^6 \quad (2.26)$$

$P_c$  = tekanan kritis

$\theta$  = perbandingan temperatur *droplet* ( $T_d$ ) dengan temperatur kritis ( $T_c$ )

Dimana  $\theta$  adalah hasil pembagian dari temperatur *droplet* dan temperatur kritis bahan bakar yang digunakan :

$$\theta = \frac{T_d}{T_c} \quad (2.27)$$

$T_d$  = Temperatur *droplet* ( $T_d$ )

$T_c$  = temperatur kritis ( $T_c$ )

## 2.5 BILANGAN TAK BERDIMENSI

Bilangan tak berdimensi (*dimensionless number*) berguna untuk mengetahui kondisi atau karakteristik suatu 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.

### 2.5.1 Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds didefinisikan sebagai 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. Namanya diambil dari Osborne Reynolds (1842–1912) yang mengusulkannya pada tahun 1883. Bentuk persamaan tersebut adalah :

$$Re = \frac{\text{gaya inersia}}{\text{gaya viskos}} = \frac{\rho V^2 / L}{\mu V / L^2} = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (2.29)$$

$\rho$  = massa jenis fluida [ $\text{kg/m}^3$ ]

$V$  = kecepatan alir fluida [ $\text{m/s}$ ]

$L$  = panjang karakteristik, berupa diameter pipa [ $\text{m}^2$ ]

$\mu$  = viskositas dinamik [ $\text{kg/m.s}$ ]

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

**Tabel II.1 Kondisi Aliran Fluida**

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

### 2.5.2 Bilangan Schmidt

Bilangan Schmidt adalah bilangan tak berdimensi yang merupakan perbandingan antara viskositas kinematik dengan difusivitas massa. Bilangan Schmidt ( $Sc$ ) adalah suatu nilai atau harga yang digunakan untuk menentukan distribusi konsentrasi pada suatu aliran juga Digunakan untuk menentukan karakter aliran fluida bila ada momentum secara simultan dan difusi massa selama proses konveksi.

Persamaannya yaitu :

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (2.30)$$

$\nu$  = viskositas kinematik [ $m^2/s$ ]

### 2.5.3 Bilangan Prandtl

Bilangan Prandtl ( $Pr$ ) merupakan suatu nilai / harga yang dipakai untuk menentukan distribusi temperatur pada suatu aliran. 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 :

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.31)$$

$\alpha$  = 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

#### 2.5.4 Bilangan Nusselt

Bilangan Nusselt merupakan bilangan yang menggambarkan karakteristik proses perpindahan panas.

$$Nu_x = \frac{hx}{k} \quad (2.33)$$

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

#### 2.5.5 Bilangan Sherwood

Bilangan Sherwood merupakan bilangan yang menggambarkan gradien konsentrasi yang terjadi pada permukaan.

$$Sh = \frac{k_c \cdot L}{D_{AB}} \quad (2.32)$$

#### 2.5.6 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.

$$Le = \frac{Sc}{Pr} \quad (2.33)$$

## 2.6 PERSAMAAN RANZ – MARSHALL

Persamaan Ranz - Marshall diperkenalkan pertama kali oleh Ranz W E & Marshall W R, Jr. pada tahun 1953, merupakan analogi (hubungan) perpindahan massa dengan perpindahan kalor. Analogi ini mempunyai persyaratan bilangan Lewis  $Le \left( \frac{Sc}{Pr} \right)$  bernilai satu dan nilai  $Re \leq 200$ .

Berikut adalah pers. Ranz - Marshall :

$$Nu = 2 + (0,6 \times Re^{1/2} Pr^{1/3}) \quad (2.34)$$

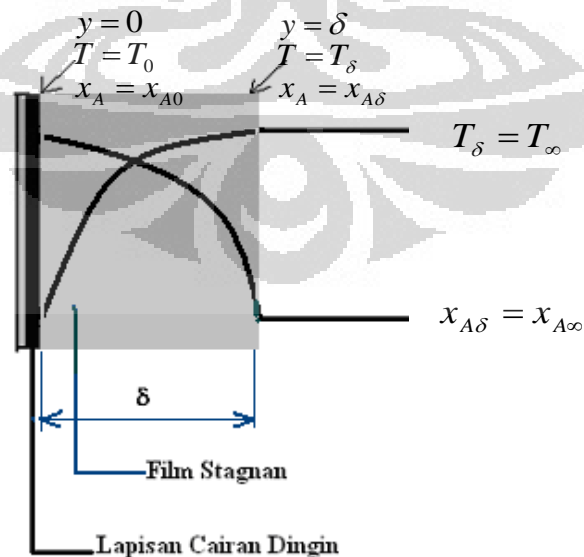
Sehingga dengan analogi untuk perpindahan massa berlaku :

$$Sh = 2 + (0,6 \times Re^{1/2} Sc^{1/3}) \quad (2.35)$$

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

## 2.7 MODEL ANALOGI FILM STAGNAN

Model analitis ini diturunkan untuk perpindahan panas dan massa yang tinggi disekitar plat datar (koordinat Cartesius).



Gambar II.1 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.

### 2.7.1 Bilangan Nusselt Model Analogi Film stagnan

$$Nu_{StF} = \frac{h_{L\_StF} \times d}{k} \quad (2.36)$$

$$h_{L\_StF} = \frac{h}{\theta_{T\_StF}} \quad (2.37)$$

$$\theta_{T\_StF} = \frac{h}{h_L} \quad (2.38)$$

$$\theta_{T\_StF} = \frac{Ln(1+R_T)}{R_T} \quad (2.39)$$

$Nu_{StF}$  = bilangan nusselt film stagnan

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

$d$  = diameter droplet [m]

$\theta_{T\_StF}$  = faktor koreksi perpindahan panas

$R_T$  = fluks perpindahan panas

### 2.7.2 Sherwood Model Film stagnan

$$Sh_{StF} = \frac{k_{cL\_StF} \times diameter}{D_{AB}} \quad (2.40)$$

$$k_{cL\_StF} = \frac{k_c}{\theta_{StF}} \quad (2.41)$$

$$\theta_{X\_StF} = \frac{k_c}{k_{cL}} \quad (2.42)$$

$$\theta_{X\_StF} = \frac{Ln(1+R_x)}{R_x} \quad (2.43)$$

$Sh_{StF}$  = bilangan *sherwood* film stagnan

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

$D_{AB}$  = Difusivitas massa

$$\begin{aligned}\theta_{X_{StF}} &= \text{faktor koreksi perpindahan massa} \\ R_X &= \text{fluks perpindahan massa}\end{aligned}$$

## 2.8 MODEL ANALOGI PENDEKATAN BARU FILM STAGNAN

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. 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.

### 2.8.1 Sherwood Model Pendekatan Baru

$$Sh_{Mod} = \frac{k_{cLMod} \times d}{D_{AB}} \quad (2.44)$$

$$k_{cLMod} = \frac{k_c}{\theta_{Mod}} \quad (2.45)$$

$$\theta_{X\_Mod} = \frac{k_c}{k_{cL}} \quad (2.46)$$

$$\theta_{X\_Mod} = \frac{\ln(1 + R_x) - C_1}{R_x} \quad (2.47)$$

$$C_1 = -0,0011 \times (Tudara - Tdroplet) - 1,0082 \times (x_{A\infty} - x_0) \quad (2.48)$$

$Sh_{Mod}$  = bilangan *sherwood* film stagan

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

$d$  = diameter droplet [m]

$D_{AB}$  = Difusivitas massa

$\theta_{X\_Mod}$  = faktor koreksi perpindahan massa

$C_1$  = parameter perpindahan massa

### 2.8.2 Bilangan Nusselt Model Pendekatan Baru

$$Nu_{Mod} = \frac{h_{LMod} \times diameter}{k} \quad (2.49)$$

$$h_{LMod} = \frac{h}{\theta_{T\_Mod}} \quad (2.50)$$

$$\theta_{T\_Mod} = \frac{h}{h_L} \quad (2.51)$$

$$\theta_{T\_Mod} = \frac{\ln(1 + R_T)}{-R_T} + \frac{C_{pA}}{k \times R_T} \cdot C_2 \quad (2.52)$$

$$C_2 = -0,4633E^{-09} \times (Tudara - Tdroplet) + 0,16E^{-06} \times (x_{A\infty} - x_0) \quad (2.53)$$

$Nu_{Mod}$  = bilangan nusselt film stagan

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

$\theta_{T\_Mod}$  = faktor koreksi perpindahan panas

$R_T$  = fluks perpindahan panas

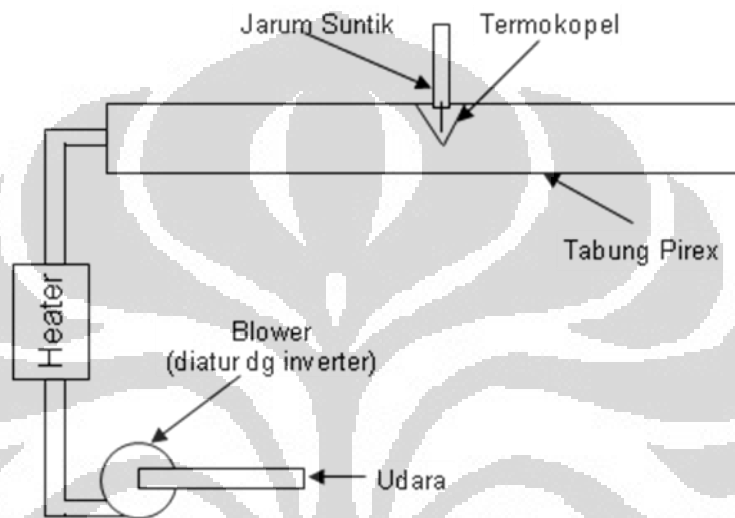
$C_2$  = parameter perpindahan panas



## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1 KOMPONEN SISTEM

Sistem pada pengujian tetesan menggunakan beberapa komponen utama, yaitu; *inverter*, *blower*, *heater*, termokopel, tabung pirex dan jarum suntik untuk meneteskan *droplet*. Adapun skema sistem pengujiannya adalah seperti gambar berikut;



Gambar III.1 Skema sistem pengujian

#### 3.1.1 Heater

*Heater* pada penelitian ini berfungsi untuk memanaskan udara karena dibutuhkan aliran udara panas. Daya maksimal yang dapat dicapai oleh heater adalah 3 kW, pada tegangan 220 VAC. Termokopel akan dipasang pada outlet *heater* sebagai *feedback* ke *Digital Controller* agar temperatur yang dihasilkan oleh heater dapat terukur dan dapat dilakukan penyesuaian dengan temperatur yang diinginkan.



Gambar IIL2 Heater (berada dalam pipa)

### 3.1.2 Blower

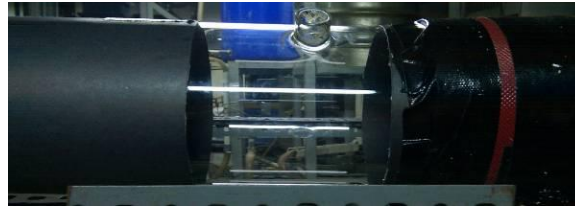
*Blower* pada penelitian ini berfungsi untuk mengalirkan udara ke dalam sistem. Tipe yang dipakai adalah *blower* sentrifugal dan dipasang sebelum heater, dengan debit  $400 \text{ m}^3/\text{jam}$ . Untuk dapat mengatur kecepatan aliran tersebut akan digunakan inverter yang akan dijelaskan di sub-bab berikutnya.



Gambar IIL3 Blower

### 3.1.3 Pyrex

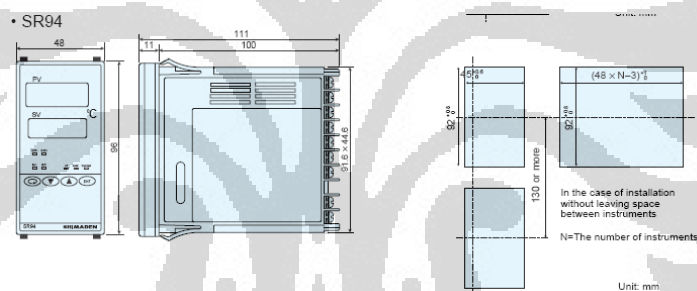
Pipa pyrex pada penelitian ini berfungsi sebagai *Test Section*. Pyrex memiliki diameter dalam 98 mm dan panjang 1500 mm. Media penguapan yang digunakan dalam penelitian ini adalah udara panas, oleh karena itu pipa pyrex ini dipilih karena kemampuan menahan panasnya cukup tinggi sehingga diharapkan tidak menimbulkan kerusakan serta tidak menimbulkan gangguan pada saat melakukan pengambilan data uji. Di bagian tengah dari pipa pyrex dibentuk lubang yang berfungsi untuk memasukkan jarum suntik dan *wire-probe thermocouple* yang akan dijadikan tempat untuk meletakkan sampel uji yang akan diuapkan.



Gambar III.4 Pyrex

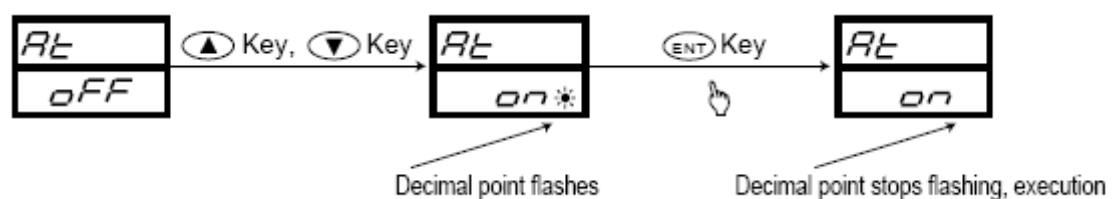
### 3.1.4 Digital Controller

*Digital Controller* berfungsi 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 III.5 Digital Controller

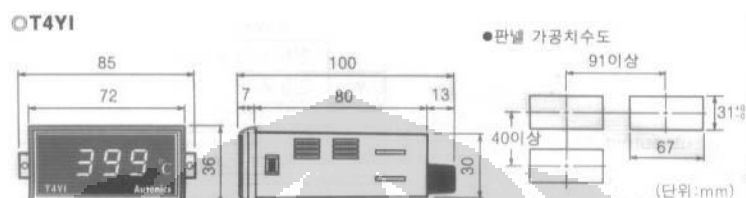
Proses penyesuaian dengan menggunakan digital controller ini dilakukan secara otomatis pada mode *auto tuning*, yakni controller itu akan bekerja menstabilkan temperature sesuai dengan kondisi yang diinginkan, dengan menyesuaikan input tegangan yang diatur menggunakan sistem PID controller sehingga penyesuaian 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 III.6 Skema Auto Tuning

### 3.1.5 Temperature Display

*Temperature Display* akan dihubungkan dengan *Wire probe thermocouple*, sehingga temperatur tetesan pada setiap aliran panas yang melaluinya dapat diukur. 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 III.7 Temperature Display

### 3.1.6 Alat Suntik

Suntikan yang digunakan adalah jenis *spinal needle 23*, yang memiliki dimensi dengan panjang 90 mm dan diameter suntikan 0.5 mm. Jenis suntikan ini dipilih karena mempunyai panjang yang mencukupi untuk diletakkan di pyrex yang mempunyai diameter 98 mm. Alat suntik ini dipergunakan untuk membuat tetesan yang akan dijatuhkan pada *wire-probe thermocouple* kemudian temperature tetesan dapat terukur dan bentuk tetesan dapat terlihat.

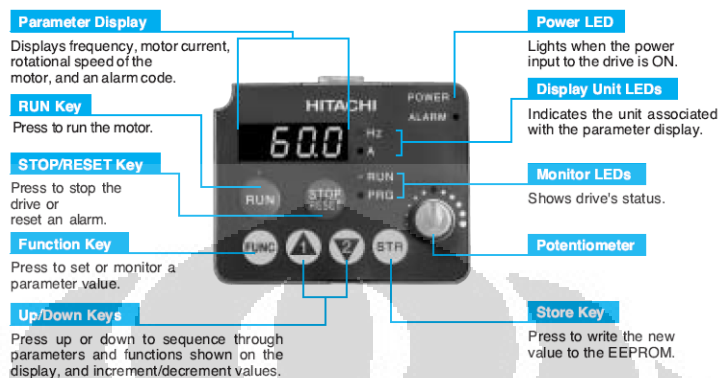


Gambar III.8 Alat Suntik

### 3.1.7 Inverter

*Inverter* pada penelitian ini berfungsi 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. Setelah melakukan pengaturan, harus menunggu keadaan stabil.

*Inverter* yang digunakan adalah jenis ST200 ini yang bisa mengatur frekwensi tegangan input ke *blower* dengan ketelitian 0.1 Hz pada temperatur kerja (  $25^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  ).



**Gambar III.9 Display Inverter ST200**

Spesifikasi Inverter :

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

### 3.2 PROSEDUR KALIBRASI DAN PENGAMBILAN DATA

Untuk mengetahui kondisi sebenarnya pada sistem maka diperlukan kalibrasi. Kondisi – kondisi yang ada dalam sistem antara lain kecepatan aliran, temperatur aliran, dan dimensi tetesan. Data yang diperoleh adalah dimensi tetesan yang dimasukkan ke *pyrex* melalui suntikan. Ada beberapa tahapan sebelum akhirnya memperoleh dimensi tetesan. Penjelasannya dapat dilihat pada sub bab berikut.

#### 3.2.1 Pengambilan Data

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

1. Mempersiapkan kamera dan tripod yang akan dipasang didepan *test section*. Mengatur ketinggian kamera agar diperoleh posisi yang sesuai dengan ketinggian *test section*. Mempersiapkan lampu pencahayaan agar foto yang dihasilkan lebih jelas kemudian mengatur fokus kamera agar diperoleh

fokus terhadap jarum, sehingga terlihat gambar ujung jarum dan *wire probe thermocouple*.



**Gambar IIL10 Posisi Jarum dan Tetesan**

2. Menghidupkan panel sistem listrik utama kemudian menyalakan blower yang diatur oleh *inverter*. Pada *inverter* terdapat pengatur kecepatan blower yang diatur agar sesuai keinginan yaitu 5 hz.



**Gambar IIL11 Panel Sistem Listrik**

3. *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.
4. Setelah temperatur *digital controller* menunjukkan angka yang relatif konstan sesuai dengan temperatur yang diinginkan, maka suntikan ditekan sampai terbentuk tetesan yang baik.



Gambar III.12 Tetesan

5. Menekan *shutter* kamera digital dengan interval 1 detik, hal ini dikarenakan penguapan bahan bakar sangat cepat. Waktu pengambilan foto hanya diperkirakan dengan melihat tetesan bahan bakar yang sudah terlihat kecil. Kemudian catat penunjukan suhu pada *wire probe-thermocouple display* sebagai temperatur tetesan pada saat pengujian dan catat juga waktu pengambilan foto yang ada di kamera digital.
6. Mengulangi langkah nomor 2 sampai dengan 6 untuk variasi frekuensi 5 Hz, 10 Hz dan 20 Hz.
7. Mengulangi langkah nomor 2 sampai dengan 7 untuk variasi temperatur 50, 75, 100 dan 150 °C.

### 3.2.3 Kalibrasi Jarum Suntik

Untuk mengubah besaran pada foto yang masih berupa *pixel* menjadi meter, dilakukanlah pengkalibrasian mata bor. Tahapan yang dilakukan adalah sebagai berikut :

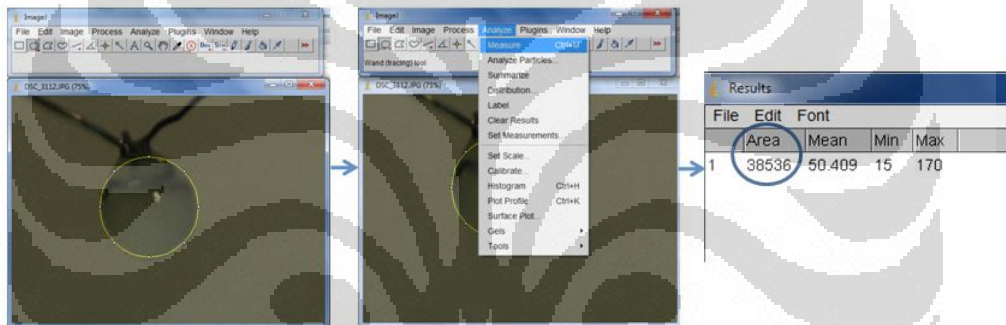
1. Melakukan proses foto pada "jarum suntik" dengan ukuran 0.5 mm.
2. Proses pengkalibrasian dilakukan dengan kondisi (posisi dan *zoom*) kamera yang sama dengan saat pengambilan data.
3. Setelah mendapatkan gambar, kemudian dilakukan *image processing* untuk mendapatkan besaran *pixel* dari gambar "jarum suntik" tersebut.
4. Setelah didapatkan besaran *pixel*, selanjutnya tinggal membagi ukuran nyata dari "jarum suntik" dalam satuan milimeter (mm) dengan besaran *pixel* dari hasil *image processing*, sehingga akan didapatkan konversi 1 *pixel* = 0,00649 mm.

### 3.3 PENGOLAHAN DATA

#### 3.3.1 Pengolahan Data Foto

Hasil yang didapatkan dalam bentuk foto akan diolah oleh *software image processing*. Untuk mengetahui dimensi dari tetesan tersebut, maka dari itu dilakukan hal seperti berikut :

1. Membuka file gambar dengan menggunakan *ImageJ*.
2. Melakukan pembesaran bidang droplet dan membuat lingkaran sebesar droplet.
3. Mengukur area luasan lingkaran tersebut, lalu cari diameter (droplet diasumsikan sebagai lingkaran).
4. Menyimpan hasil pencatatan data dalam bentuk tabel excel agar dapat diolah dengan sistematis.



Gambar III.13 Pengolahan Data Tetesan

Dari hasil pengujian, didapatkan data tetesan sebagai berikut;

Tabel III.1 Data Experimen (tetesan)

$T_{\infty}$ [°C]	$T_d$ [°C]	D [mm]	dD/dt [m/s]
50	18	0,0013	2,4E-05
50	20	0,0013	2,578E-05
50	22	0,0011	2,882E-05
75	49	0,0010	3,718E-05
75	50	0,0012	3,917E-05
75	52	0,0011	4,456E-05
100	70	0,0011	5,678E-05
100	72	0,0011	5,961E-05
100	74	0,0009	7,424E-05



### 3.3.2 Pengolahan Data Kecepatan

Agar memperoleh data kecepatan dalam satuan meter per detik, maka dilakukan pengujian kecepatan dengan cara mengalirkan asap pada test section. Prinsip kerjanya adalah menggunakan baterai sebagai sumber listrik untuk memanaskan kawat tembaga dililitkan dengan kabel yang terhubung dengan rangkaian baterai. Baterai disusun secara paralel dengan jumlah baterai sebanyak 10 buah. Tegangan masing-masing baterai adalah 1,5 volt karena disusun paralel tegangan totalnya 1,5 volt tetapi jumlah arusnya merupakan arus total seluruh baterai. Oli digunakan sebagai media untuk menimbulkan asap pada *test section* dengan memanaskannya memanfaatkan energi listrik yang mengalir pada kawat yg tembaga. Dengan menggunakan *high speed camera*, rekam perpindahan asap yang terjadi pada *test section*. Penyusunan rangkaian dengan 10 buah baterai secara paralel karena pengujian dilakukan dalam waktu yang lama sehingga ditujukan untuk mengurangi efek polarisasi pada baterai yang dapat memutuskan aliran listrik. Untuk memperoleh besarnya kecepatan aliran yang mengalir dalam *test section*, maka dilakukan langkah-langkah pengujian sebagai berikut :

1. Menyusun baterai dalam rangkaian paralel lalu meletakkan pada dudukan baterai yang terbuat dari kayu. Rangkaian ini dihubungkan dengan kabel yang dililitkan pada kawat tembaga. Dimana satu bagian dari kabel yang terhubung ke kawat tembaga difungsikan sebagai saklar.



Gambar III.14 Rangkaian Baterai

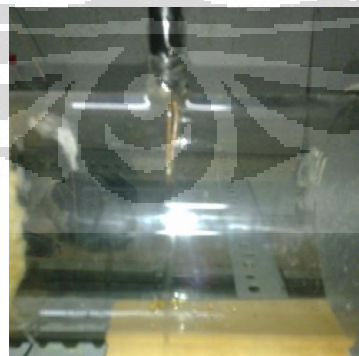
2. Mengatur posisi *high speed camera* yang ditempatkan pada tripod dan ditempatkan didepan *test section*. Pengaturan pencahayaan pada test section bertujuan agar mendapatkan gambar dapat terlihat dalam pixel yang

lebih besar. Kemudian mengatur kapasitas pengambilan gambar sebesar 1000 *frame* per detik pada *software* yang dioperasikan dengan laptop yang terhubung dengan *high speed camera*.



**Gambar III.15 High Speed Camera**

3. Frekuensi awal pengujian dilakukan pada 5 Hz. Masukkan input frekuensi ini dengan mengatur frekuensi pada inverter sebesar 5 Hz.
4. Masukkan temperatur 50 °C sebagai input pada *digital controller*.
5. Kawat tembaga dicelupkan kedalam oli lalu diletakkan pada *test section*. Hubungkan kabel yang berfungsi sebagai saklar agar aliran listrik dapat mengalir dari kutub negatif baterai melalui kawat tembaga.



**Gambar III.15 Kawat Tembaga**

6. Setelah listrik dialirkan pada kawat tembaga, rekam perpindahan asap yang dihasilkan dari oli dengan menggunakan *high speed camera*.

7. Data yang dihasilkan dalam format video yang kemudian di konversi dalam bentuk foto atau *file bitmap*.
8. Mengulangi langkah pada nomor 3 hingga nomor 7 dengan memasukkan variasi frekuensi 5, 10, 20 Hz dan temperatur pada 50, 75 dan 100°C.
9. Menghitung kecepatan rata-rata asap dan simpangan bakunya pada setiap temperatur dan setiap frekuensi. Adapun data kecepatan yang kita ukur mempunyai penyimpangan rata-rata sekitar 12 %.

**Tabel III.2 Data Kecepatan Aliran Udara Pipa (kecepatan asap)**

$T_{\infty}$ [°C]	$u_{avg}$ [m/s]	Simp Baku	$u_{avg-}$ Simp [m/s]	$u_{avg+}$ Simp [m/s]
50	0,40	0,05	0,36	0,45
50	0,80	0,16	0,64	0,96
50	1,45	0,09	1,36	1,53
75	0,42	0,06	0,36	0,48
75	0,85	0,13	0,72	0,98
75	1,77	0,17	1,60	1,94
100	0,44	0,05	0,39	0,49
100	1,00	0,12	0,89	1,12
100	1,87	0,26	1,61	2,13

### 3.3.3 Contoh Perhitungan

Setelah didapat diameter *droplet* dan kecepatan rata-rata pada *pyrex* untuk setiap kondisi kecepatan dan suhu, selanjutnya dapat dilakukan pengolahan data. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat dari contoh perhitungan dibawah ini.

Mengambil satu contoh perhitungan data :

1. Larutan pertamax
2. Temperatur = 50 °C Frekuensi *inverter* = 5 Hz
3.  $T_{udara}$  pada termokopel = 50 °C,  $T_{droplet}$  = 18 °C

4. Dari hasil pengukuran *imageJ* diperoleh luasan droplet dengan asumsi berbentuk lingkaran, kemudian diolah dengan menggunakan *software spreadsheet* untuk mencari dimensi droplet rata-rata :

$$D_{\text{rata-rata}} = 0,00131549 \text{ m}$$

Selanjutnya bisa dilakukan langkah-langkah analisa perhitungan sebagai berikut :

1. Menghitung laju difusi molal (N)

$$-\frac{dm}{dt} = \rho \frac{dv}{dt}$$

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

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

$$\frac{dr}{dt} = \frac{3,17E-05}{2}$$

$$\frac{dr}{dt} = 1,585E-05$$

$$N = \frac{dm/dt}{M}$$

$$N = \frac{\rho_{\text{air}} 1,585 \times 10^{-5}}{144}$$

$$N = \frac{705 \times 1,585 \times 10^{-5}}{144}$$

$$N = 7,75E-05 \frac{\text{K mole}}{\text{s.m}^2}$$

2. Menghitung fraksi mol uap pada permukaan droplet ( $x_0$ )

Tekanan uap ( $P_v$ ) pada temperatur droplet 24°C adalah :

$$\ln P_{vp} = f^{(0)} T_r + \omega f^{(1)} T_r$$

Dimana  $\omega$  adalah accentric faktor yang diperoleh dari :

$$\omega = \frac{\alpha}{\beta}$$

$$\omega = \frac{-0,9924}{-2,369} = 0,363$$

Dimana  $\alpha$  dan  $\beta$  diperoleh dari :

$$\alpha = -\ln P_c - 5,97214 + 6,09648 \theta^{-1} + 1,28861 \ln \theta - 0,169347 \theta^6$$

$$\beta = 15,2518 - 15,6875 \theta^{-1} - 13,3721 \ln \theta - 0,43577 \theta^6$$

$$\theta = \frac{T_b}{T_c}$$

$$\theta = \frac{390,9}{561,7} = 0,695$$

$$\alpha = -\ln 25,067 - 5,97214 + 6,09648 \times 0,695^{-1} + 1,28861 \ln 0,695 - 0,169347 \times 0,695^6$$

$$\beta = 15,2518 - 15,6875 \times 0,695^{-1} - 13,3721 \ln 0,695 - 0,43577 \times 0,695^6$$

$$\alpha = -0,8625$$

$$\beta = -2,369$$

Maka dari itu untuk menghitung faktor korelasi  $f^{(0)}$  dan  $f^{(1)}$  dibutuhkan  $T_r$ , yaitu :

$$T_r = \frac{T_d}{T_c}$$

$$T_r = \frac{24 + 273}{561,7} = 0,528$$

$$f^{(0)} = 5,92714 - \frac{6,09648}{0,528} - 1,28862 \ln 0,528 + 0,16934 \times 0,528^6$$

$$f^{(0)} = -4,77464$$

$$f^{(1)} = 15,2518 - \frac{15,6875}{0,528} - 13,4721 \ln 0,528 + 0,43577 \times 0,528^6$$

$$f^{(1)} = -5,82269$$

Jadi  $P_{vp}$  adalah :

$$\ln P_{vp} = -4,77464 + 0,363 \times -5,82269$$

$$P_{vp} = EXP - 6,858 = 0,00105 \text{ bar} = 101,63 \text{ pascal}$$

$$X_0 = 101,63/101325 = 0,0010$$

### 3. Menghitung konsentrasi total udara (C)

$T_{\text{film}}$  adalah temperature udara pada termokopel saat belum di berikan tetesan ditambah temperature sesudah diberikan tetesan.

$$t_f = \frac{t_u + t_d}{2}$$

$$t_f = 273 \left( \frac{24 + 50}{2} \right)$$

$$t_f = 310 \text{ k}$$

C diperoleh dari :

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

$$C = \frac{101325}{8314,5 \times 310}$$

$$C = 0,039$$

4. Menghitung fluks perpindahan massa ( $R_x$ )

$$R_x = \frac{x_o - x_{a\infty}}{1 - x_o}$$

$$R_x = \frac{0,0010 - 0}{1 - 0,0010}$$

$$R_x = 0,001004$$

5. Menghitung koefisien perpindahan massa ( $k_c$ )

$$k_c = \frac{N(1 - x_o)}{C(x_o - x_{a\infty})}$$

$$k_c = \frac{1,9E - 05(1 - 0,0010)}{0,039(0,0010 - 0)}$$

$$k_c = 0,49 \text{ kmole/s.m}^2$$

6. Menghitung faktor koreksi perpindahan massa untuk model analogi film stagnan ( $\theta_{stF}$ ) :

$$\theta_{stF} = \frac{k_c}{k_{cl}} = \frac{\ln(1 + R_x)}{R_x}$$

$$\theta_{stF} = \frac{\ln(1 + 0,0010)}{0,0010}$$

$$\theta_{stF} = 0,999$$

7. Menghitung koefisien laju perpindahan massa model film stagnan  $k_c$  menuju  $k_{clstF}$  ketika  $N_{A0}$  menuju nol

$$k_{clstF} = \frac{k_c}{\theta_{stF}}$$

$$k_{clstF} = \frac{0,49}{0,9996}$$

$$k_{clstF} = 0,495$$

8. Menghitung difusivitas massa A dalam B ( $D_{ab}$ )

$$D_{ab} = \frac{0,00143T^{1,75}}{PM_{ab}^{\frac{1}{2}} \left[ (\Sigma_{va})^{\frac{1}{3}} + (\Sigma_{vb})^{\frac{1}{3}} \right]^2}$$

$$\Sigma_{va} = 19,7$$

$$\Sigma_{vb} = (8 \times 15,9) + (18 + 2,31) = 168,78$$

$$M_{ab} = 2 \left[ \left( \frac{1}{114} + \frac{1}{29} \right) \right]^{-1} = 46,2$$

$$D_{ab} = \frac{0,00143297^{1,75}}{101325}$$

$$D_{ab} = \frac{6,5E^{-06}m^2}{s}$$

9. Menghitung Sherwood model film stagnan ( $Sh_{stF}$ )

$$Sh_{stF} = \frac{k_{clstF} \times D}{D_{ab}}$$

$$Sh_{stF} = \frac{0,495 \times 0,00224}{6,5E^{-06}} = 170,13$$

10. Menentukan parameter perpindahan massa ( $C_1$ )

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

$$C_1 = -0,0011 \times (50 - 24) - 1,0082 \times (0 - 0,0010)$$

$$C_1 = -0,027$$

11. Menghitung faktor koreksi perpindahan massa untuk model analogi pendekatan baru ( $\theta_{Mod}$ )

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

$$\theta_{Mod} = \frac{\ln(1 + 0,001004) - (-0,027)}{0,001004}$$

$$\theta_{Mod} = 28,4$$

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

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

$$k_{cLMod} = \frac{0,49}{28,4}$$

$$k_{cLMod} = 0,017$$

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

$$Sh_{Mod} = \frac{k_{cLMod} \times D}{D_{ab}}$$

$$Sh_{Mod} = \frac{0,017 \times 0,00224}{6,5E^{-06}}$$

$$Sh_{Mod} = 5,9$$

14. Mencari angka reynold (Re) pada droplet

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu}$$

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu}$$

Dimana :

$\rho$  = massa jenis udara ( $kg/m^3$ )

$U$  = kecepatan pada droplet (m/s)

$d$  = diameter rata – rata (m)

$\mu$  = viskositas dinamik (kg/m.s)

$\nu$  = difusivitas momentum atau viskositas kinematik ( $m^2/s$ )

Asumsi Kecepatan di droplet = 0,236 kecepatan rata-rata *pyrex*.

$$U_{max} = 0,40 \text{ m/s dan } \nu = 1,3E^{-05} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Re = \frac{0,40 \times 0,00224}{1,6E^{-05}}$$

$$Re = 31,70$$

15. Menghitung bilangan Schmidt

$$Sc = \frac{\nu}{D_{ab}}$$

$$Sc = \frac{2,47E^{-05}}{6,5E^{-06}}$$



$$Sc = 3,8$$

16. Menghitung bilangan Sherwood (pers. Ranz - Marshall)

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

$$Sh = 6,15$$

Langkah- langkah Mencari Perpindahan Panas

17. Menghitung nilai konduktivitas campuran (K) dengan  $T_f = 310$  K sehingga dapat dicari nilai rapat massa udara ( $\rho$ ), panas jenis udara ( $cp$ ) dan difusivitas termal ( $\alpha$ ) dari table sifat-sifat udara

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

$$k = 1,136 \times 1007,51 \times 2,3E^{-05}$$

$$k = 0,026$$

18. Menghitung  $q_{radiasi}/A$

$$\frac{Q_{radiasi}}{A} = 0,96 \times 0,5669E^{-07} \times ((273 + T_{udara})^4 - (273 + T_{droplet})^4)$$

$$\frac{Q_{radiasi}}{A} = 0,96 \times 0,5669E^{-07} \times ((273 + 50)^4 - (273 + 24)^4)$$

$$\frac{Q_{radiasi}}{A} = 168,92$$

19. Menghitung  $q_0/A$ , dengan konduksi dari termokopel  $Q_{konduksi} = 125,932$  dan kalor laten pada temperature droplet  $24^\circ C$  sebesar  $h_{fg} = 39840$  KJ/Kmol dari table sifat air jenuh

$$\frac{q_0}{A} = -N \times Hfg + Q_{konduksi} + Q_{radiasi}$$

$$\frac{q_0}{A} = -1,95E^{-05} \times 39850168 + 125,934 + 168,929$$

$$\frac{q_0}{A} = -483,305$$

20. Menghitung koefisien perpindahan panas h

$$h = \frac{q_0/A}{(T_{droplet} - T_{udara})}$$

$$h = \frac{-483,205}{-26}$$

$$h = 18,58$$

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

$$h_l = \frac{(2 \times 0,6 \times Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}})}{d} \times k$$

$$h_l = \frac{(2 \times 0,6 \times 4,9)}{0,00224} \times 0,0268$$

$$h_l = 56,513$$

22. Menghitung panas jenis molal udara  $C_{pA}$

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

$$C_{pA} = 1007,51 \times 28,9$$

$$C_{pA} = 29117,032$$

23. Menghitung factor kecepatan perpindahan panas ( $\Phi$ )

$$\varphi = \frac{-N \times C_{pA}}{h_l}$$

$$\varphi = \frac{-1,9E^{-05} \times 29117,032}{56,513}$$

$$\varphi = -0,01038$$

24. Menghitung fluks perpindahan panas ( $R_T$ )

$$RT = e^{\varphi} - 1$$

$$RT = e^{-0,01038} - 1$$

$$RT = -0,01032$$

25. Menghitung faktor koreksi perpindahan panas untuk model analogi film stagnan ( $\theta_{StF}$ )

$$\theta_{T_{StF}} = \frac{h}{h_l} = \frac{\ln(1 + R_T)}{R_T}$$

$$\theta_{T_{Stf}} = \frac{\ln(1 + (-0,01032))}{-0,01032}$$

$$\theta_{T_{Stf}} = 1,005$$

26. Menghitung parameter perpindahan panas ( $C_2$ )

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

$$C_2 = 0,4633E^{-09} \times (50 - 24) + 0,16E^{-06} \times (-0,00103)$$

$$C_2 = -1,2E^{-08}$$

27. Menghitung faktor koreksi perpindahan panas untuk model analogi pendekatan baru ( $\theta_{Mod}$ )

$$\theta_{T_{Mod}} = \frac{h}{h_l} = \frac{\ln(1 + R_T)}{R_T} + \frac{Cpa}{k \times R_T} \times C_2$$

$$\theta_{T_{Mod}} = \frac{\ln(1 \pm 0,01032)}{-0,01032} + \frac{29117,032}{0,0268 \times -0,01032} \times -1,2E^{-08}$$

$$\theta_{T_{Mod}} = 2,28$$

28. Menghitung koefisien laju perpindahan panas model film stagnan  $h$  menuju  $h_{L_{Stf}}$  ketika  $N_{A0}$  menuju nol

$$h_{L_{Stf}} = \frac{h}{\theta_{T_{Stf}}}$$

$$h_{L_{Stf}} = \frac{18,58}{1,005}$$

$$h_{L_{Stf}} = 18,49 \frac{\text{watt}}{\text{m}^2\text{K}}$$

29. Menghitung koefisien laju perpindahan panas model pendekatan baru  $h$  menuju  $h_{L_{Mod}}$  ketika  $N_{A0}$  menuju nol

$$h_{L_{mod}} = \frac{h}{\theta_{T_{mod}}}$$

$$h_{L_{mod}} = \frac{18,58}{2,28}$$

$$h_{L_{mod}} = 8,12 \frac{\text{watt}}{\text{m}^2\text{K}}$$

## 30. Menghitung bilangan Prandtl (Pr)

Dengan  $T_f = 310$  K dapat dicari nilai Pr dari table sifat-sifat udara tekanan atmosfer pada lampiran ....

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

$$Pr = \frac{1,6E^{-05}}{2,3E^{-05}}$$

$$Pr = 0,71$$

## 31. Menghitung bilangan Nusselt (pers. Ranz - Marshall)

$$Nu = 2 + \left(0,6 \times Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}\right)$$

$$Nu = 2 + (0,55 \times 4,93)$$

$$Nu = 4,76$$

## 32. Menghitung bilangan Nusselt model analogi film stagan

$$Nu_{stf} = \frac{h_{lstf} \times diameter}{k}$$

$$Nu_{stf} = \frac{18,49 \times 0,00224}{0,0268}$$

$$Nu_{stf} = 1,54$$

## 33. Menghitung bilangan Nusselt model pendekatan baru

$$Nu_{mod} = \frac{h_{lmod} \times diameter}{k}$$

$$Nu_{mod} = \frac{8,12 \times 0,00224}{0,0268}$$

$$Nu_{mod} = 0,67$$

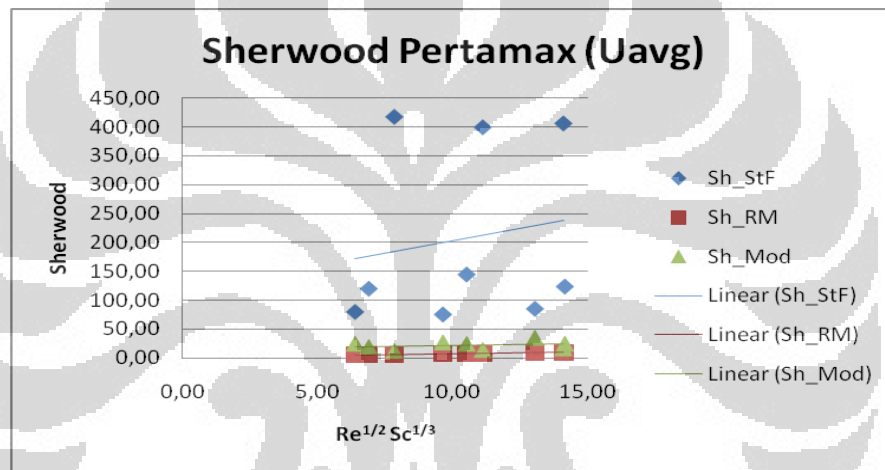
## 34. Menghitung bilangan Lewis

$$Le = \frac{Sc}{Pr} = \frac{3,8}{0,71} = 3,6$$

## BAB IV HASIL DAN ANALISA

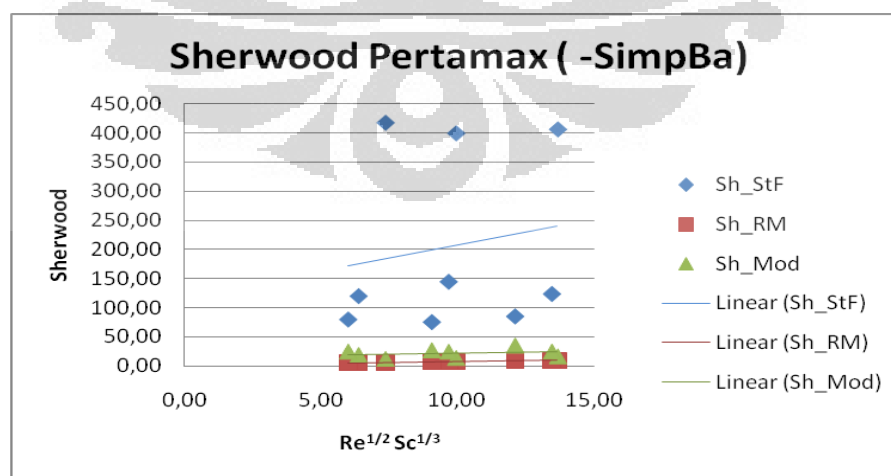
### 4.1 ANALISA PERBANDINGAN NILAI SHERWOOD ANTAR MODEL

Menggunakan hasil perhitungan pada Bab III, maka akan diperoleh nilai Nusselt dan Sherwood yang beragam tergantung metode yang digunakan. Hasil tersebut akan dianalisa melalui grafik yang akan membandingkan penggunaan metode Film dengan analogi Ranz-Marshall dan model analogi pendekatan baru serta metode analogi film stagnan serta berdasarkan data kecepatan udara yang digunakan. Berikut adalah grafik hasil perbandingan antar model untuk bilangan Sherwood pada pertamax ;



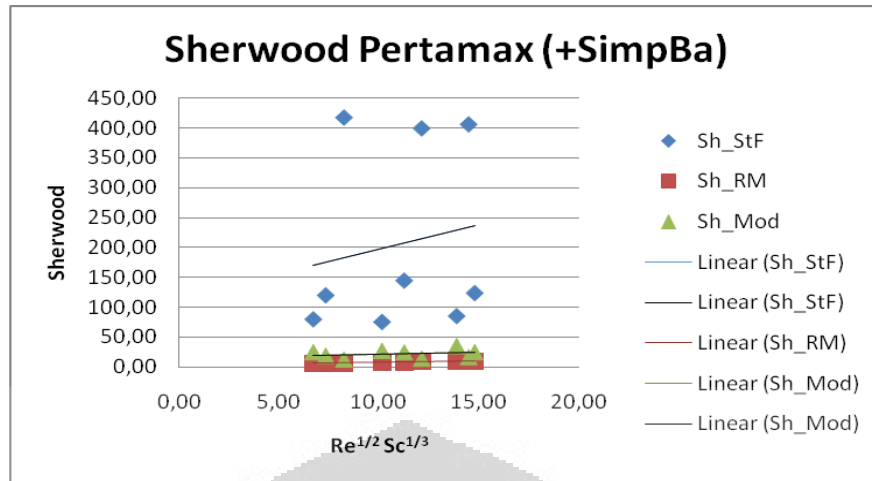
Gambar IV.1 Perbandingan Bilangan Sherwood antar Model pada Pertamax

(a)



Gambar IV.2 Perbandingan Bilangan Sherwood antar Model pada Pertamax

(b)



Gambar IV.3 Perbandingan Bilangan Sherwood antar Model pada Pertamax

(c)

Grafik a, b dan c adalah Grafik perbandingan secara berturut-turut, (a) dengan nilai kecepatan udara rata-rata, (b) dengan nilai kecepatan udara rata-rata dikurangi simpangan baku dan (c) dengan nilai kecepatan udara rata-rata ditambah simpangan baku.

Dari grafik diatas dapat dilihat nilai Sherwood E. A. Kosasih dan Film stagnan berada diatas penyebaran nilai Sherwood yang menggunakan Ranz-Marshall. Akan tetapi nilai Sherwood yang didapat dengan analogi E. A. Kosasih lebih dekat dengan acuan analogi Ranz Marshall. Hal ini dikarenakan karena pada model analogi film stagnan menggunakan nilai  $kl_{StF}$  yang nilainya cenderung besar jika dibandingkan dengan nilai  $kl_{Mod}$  yang lebih kecil. Perbedaan ini memberikan perbedaan nilai yang signifikan pada nilai sherrwood, seperti yang terlihat pada tabel berikut :

Tabel IV.2 Hasil perhitungan sher wood

Re	ShR_M	klLStF	klLMod	ShStF	ShMod
31,55	6,30	1,98	0,05	416,82	11,54
63,54	8,10	1,86	0,06	398,79	13,11
102,28	9,74	2,13	0,08	405,56	15,89
24,36	5,78	0,76	0,12	120,12	18,27
56,78	7,77	0,80	0,13	144,57	23,87
102,92	9,77	0,79	0,15	123,76	24,17
20,90	5,50	0,62	0,19	79,93	24,31
47,70	7,29	0,59	0,21	75,66	26,53
87,42	9,16	0,68	0,27	85,36	34,66

Perbedaan nilai yang signifikan pada nilai  $kcl_{StF}$  dan nilai  $kcl_{Mod}$  terjadi pada parameter perpindahan massa yaitu  $\theta_{stf}$  dan  $\theta_{mod}$ . Pada model analogi E. A. Kosasih telah dimasukkan faktor  $C_1$  untuk menghitung nilai  $\theta_{mod}$ . Nilai  $C_1$  membuat model analogi E. A. Kosasih lebih mendekati nilai model analogi Ranz-Marshall. Akan tetapi model analogi Ranz-Marshall tidak dapat digunakan karena memiliki syarat bilangan Lewis 1. Pada pertamax, bilangan Lewis yang didapat adalah 3-4, jadi analogi Ranz-Marshall tidak aplikatif pada bahan uji ini. Pada dasarnya model analogi Ranz-Marshall memang untuk laju perpindahan panas, lalu analoginya dipakai untuk perpindahan massa tapi dengan syarat bilangan Lewis 1.

Dan penyimpangan data kecepatan yang telah diukur tidak banyak mempengaruhi nilai bilangan Sherwood Nusselt pada model analogi Ranz-Marshall, sehingga tren perbandingan antar model masih sama dengan menggunakan data kecepatan rata-rata udara dalam pipa yang telah diukur.

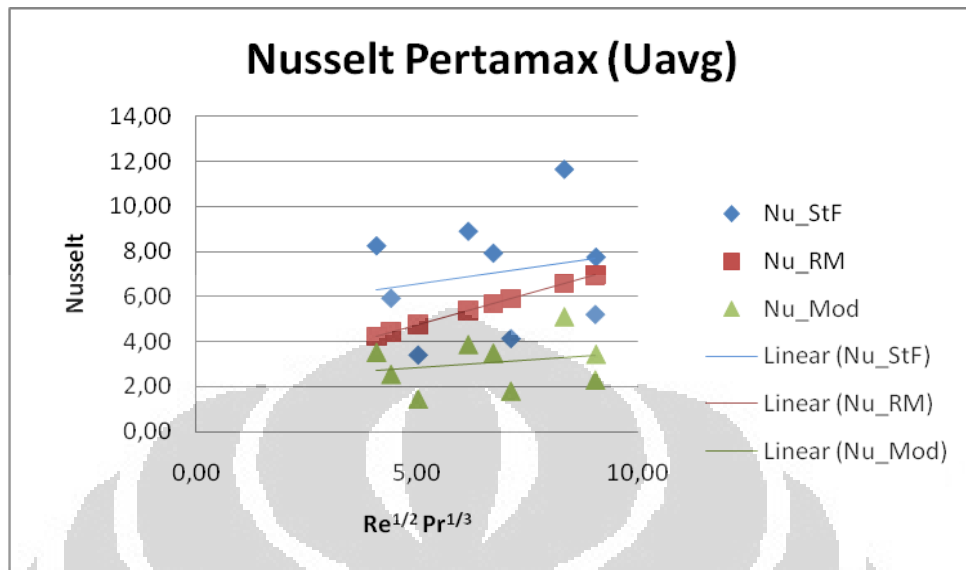
**Tabel IV.2 Perbandingan nilai sher wood**

(berdasarkan data kecepatan udara dan simpangan baku)

$u_{avg}$		$u_{avg}-SimpBaku$		$u_{avg}+SimpBaku$	
Re	ShR_M	Re	ShR_M	Re	ShR_M
31,55	6,30	27,96	6,05	35,14	6,54
63,54	8,10	50,98	7,46	76,10	8,67
102,28	9,74	96,21	9,51	108,35	9,97
24,36	5,78	20,95	5,51	27,76	6,03
56,78	7,77	48,13	7,31	65,44	8,19
102,92	9,77	93,03	9,39	112,80	10,13
20,90	5,50	18,54	5,30	23,26	5,69
47,70	7,29	42,21	6,97	53,18	7,58
87,42	9,16	75,37	8,65	99,48	9,64

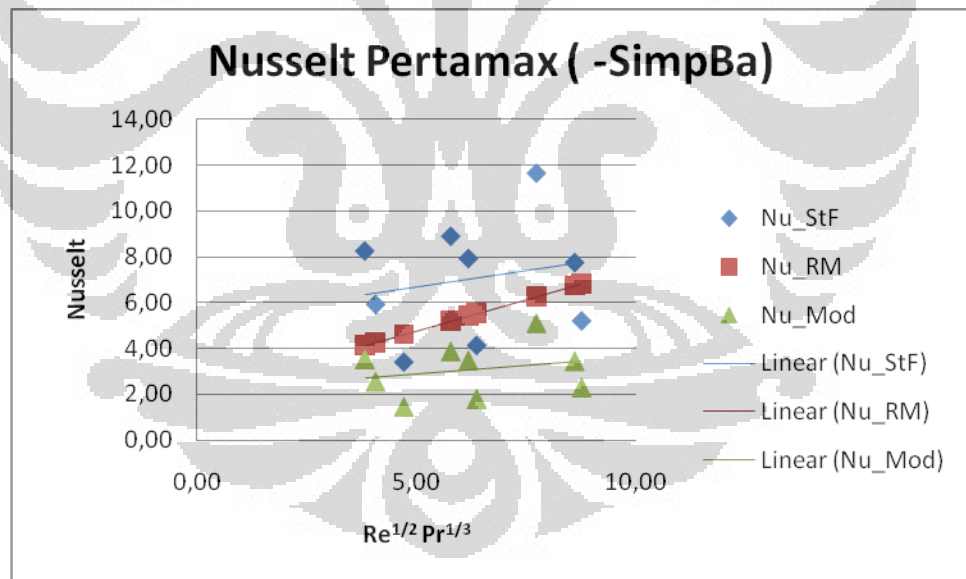
## 4.2 ANALISA PERBANDINGAN NILAI NUSELTT ANTAR MODEL

Untuk Bilangan Nusselt diperoleh grafik sebagai berikut :



Gambar IV.4 Perbandingan Bilangan Nusselt antar Model pada Pertamax

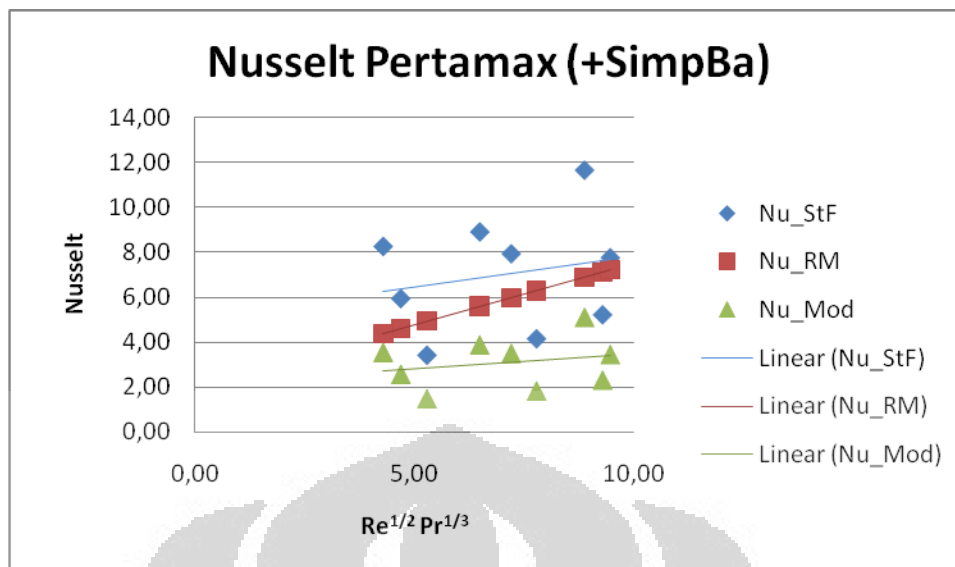
(a)



Gambar IV.5 Perbandingan Bilangan Nusselt antar Model pada Pertamax

(b)





Gambar IV.6 Perbandingan Bilangan Nusselt antar Model pada Pertamax

(c)

Penyebaran nilai model E. A. Kosasih tetap lebih baik dibandingkan dengan model film stagnan. Model E. A. Kosasih memiliki faktor koreksi  $C_2$  yang mempengaruhi nilai penyebaran pada model E. A. Kosasih. Dan nilai penyimpangan baku pada kecepatan udara pun tidak berpengaruh pada tren grafik di atas.

Penyimpangan data kecepatan yang telah diukur tidak banyak mempengaruhi nilai bilangan Nusselt pada model analogi Ranz-Marshall dan model modifikasi, sehingga tren perbandingan antar model masih sama dengan menggunakan data kecepatan rata-rata udara dalam pipa yang telah diukur.

Tabel IV.3 Hasil perhitungan nusselt

NuR-M	hLstf	hLmod	Nustf	Numod
4,76	71,33	30,58	3,43	1,47
5,91	84,62	36,99	4,15	1,82
6,96	119,20	52,72	5,22	2,31
4,42	152,42	65,60	5,94	2,56
5,69	178,31	78,46	7,94	3,49
6,97	199,28	88,55	7,76	3,45
4,24	243,37	104,11	8,27	3,54
5,38	263,35	114,54	8,91	3,88
6,58	349,17	152,87	11,66	5,11

**Tabel IV.4 Perbandingan nilai nusselt****(berdasarkan data kecepatan udara dan simpangan baku)**

$u_{avg}$		$u_{avg}-SimpBaku$		$u_{avg}+SimpBaku$	
NuR-M	Numod	NuR-M	Numod	NuR-M	Numod
4,76	1,47	4,60	1,46	4,91	1,47
5,91	1,82	5,51	1,81	6,28	1,82
6,96	2,31	6,81	2,31	7,11	2,31
4,42	2,56	4,24	2,55	4,58	2,57
5,69	3,49	5,40	3,48	5,97	3,51
6,97	3,45	6,73	3,44	7,21	3,46
4,24	3,54	4,11	3,52	4,36	3,55
5,38	3,88	5,18	3,86	5,57	3,89
6,58	5,11	6,25	5,09	6,88	5,12



## **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

### **5.1 KESIMPULAN**

1. Model modifikasi (E. A. Kosasih, 2006) mempunyai korelasi yang lebih kuat dibandingkan dengan model film stagnan.
2. Model analogi Ranz-Marshall tidak aplikatif untuk menghitung laju perpindahan massa karena bahan bakar memiliki bilangan Lewis ( $Le$ ) diantara 3-4.
3. Nilai bilangan Sherwood pada model E. A. Kosasih lebih dekat dengan analogi Ranz-Marshall dibandingkan dengan model film stagnan.
4. Nilai bilangan Nusselt pada model E. A. Kosasih lebih dekat dengan analogi Ranz-Marshall dibandingkan dengan model film stagnan.

### **5.2 SARAN**

1. Proses pengambilan foto lebih baik menggunakan kamera dengan pixel yang lebih teliti.
2. Dibutuhkan alat ukur kecepatan yang sangat mendukung terutama alat ukur yang dapat beroperasi dengan baik pada temperature tinggi.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bennett C.O., Myers J.E. *Momentum, Heat and Mass Transfer*, (New York: McGraw Hill, 1982)
- [2] Cengel, Yunus A., Michael A.Boles, *Thermodynamics An Engineering Approach*, (New York : McGraw Hill, 1994)
- [4] Holman , J.P., *Perpindahan Kalor*, terj.E.Jasjfi (Jakarta: Erlangga, 1991).
- [5] Incropera, Frank P., David P. De Witt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, (New York: John Wiley & Sons, 1996).
- [6] 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
- [7] Reynolds, William C., Henry Perkins, *Termodinamika Teknik*, terj.Filino Harahap (Jakarta: Erlangga, 1991).
- [8] Robert, C., Reid, Jhon, M., Prausnitz, Bruce, E., Poling, *The Properties of GASES & LIQUIDS*, (New York: Robert, C., Reid & Virginia Sherwood, 1986)
- [9] Yosuo Moriyoshi, Yosuo Imai. (2005). Quasi 2-D Measurements of Gaseous and Liquid Fuel Concentrations Using Two-Color Laser Beam Scanning Technique. Japan.
- [10] Kosasih, E. A., “*Heat and Mass Transfer in Water Droplet Evaporation: A New Approach on Film Stagnant Model*”, The 9<sup>th</sup> Quality in Research (QIR) International Conference, Indonesia, 2006.
- [11] Kosasih, E. A., “*Droplet Evaporation Rate: A Comparison between Stagnant Film Model and Modified Model*”, The 9<sup>th</sup> Quality in Research (QIR) International Conference, Indonesia, 2006.

# LAMPIRAN 1

## TABEL SIFAT UDARA PADA TEKANAN ATMOSFER

Sifat-sifat Udara pada Tekanan Atmosfer†  
 Nilai  $\mu$ ,  $k$ ,  $c_p$ , dan Pr tidak terlalu bergantung pada tekanan dan dapat digunakan untuk rentang tekanan yang cukup luas.

T, K	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$c_p$ , kJ/kg · °C	$\mu$ , kg/m · s × 10 <sup>5</sup>	$\nu$ , m <sup>2</sup> /s × 10 <sup>6</sup>	$k$ , W/m · °C	$\alpha$ , m <sup>2</sup> /s × 10 <sup>4</sup>	Pr
100	3.6010	1.0266	0.6924	1.923	0.009246	0.02501	0.770
150	2.3675	1.0099	1.0283	4.343	0.013735	0.05745	0.753
200	1.7684	1.0061	1.3289	7.490	0.01809	0.10165	0.739
250	1.4128	1.0053	1.5990	11.31	0.02227	0.15675	0.722
300	1.1774	1.0057	1.8462	15.69	0.02624	0.22160	0.708
350	0.9980	1.0090	2.075	20.76	0.03003	0.2983	0.697
400	0.8826	1.0140	2.286	25.90	0.03365	0.3760	0.689
450	0.7833	1.0207	2.484	31.71	0.03707	0.4222	0.683
500	0.7048	1.0295	2.671	37.90	0.04038	0.5564	0.680
550	0.6423	1.0392	2.848	44.34	0.04360	0.6532	0.680
600	0.5879	1.0551	3.018	51.34	0.04659	0.7512	0.680
650	0.5430	1.0635	3.177	58.51	0.04953	0.8578	0.682
700	0.5030	1.0752	3.332	66.25	0.05230	0.9672	0.684
750	0.4709	1.0856	3.481	73.91	0.05509	1.0774	0.686
800	0.4405	1.0978	3.625	82.29	0.05779	1.1951	0.689
850	0.4149	1.1095	3.765	90.75	0.06028	1.3097	0.692
900	0.3925	1.1212	3.899	99.3	0.06279	1.4271	0.696
950	0.3716	1.1321	4.023	108.2	0.06525	1.5510	0.699
1000	0.3524	1.1417	4.152	117.8	0.06752	1.6779	0.702
1100	0.3204	1.160	4.44	138.6	0.0732	1.969	0.704
1200	0.2947	1.179	4.69	159.1	0.0782	2.251	0.707
1300	0.2707	1.197	4.93	182.1	0.0837	2.583	0.705
1400	0.2515	1.214	5.17	205.5	0.0891	2.920	0.705
1500	0.2355	1.230	5.40	229.1	0.0946	3.262	0.705
1600	0.2211	1.248	5.63	254.5	0.100	3.609	0.705
1700	0.2082	1.267	5.85	280.5	0.105	3.977	0.705
1800	0.1970	1.287	6.07	308.1	0.111	4.379	0.704
1900	0.1858	1.309	6.29	338.5	0.117	4.811	0.704
2000	0.1762	1.338	6.50	369.0	0.124	5.260	0.702
2100	0.1682	1.372	6.72	399.6	0.131	5.715	0.700
2200	0.1602	1.419	6.93	432.6	0.139	6.120	0.707
2300	0.1538	1.482	7.14	464.0	0.149	6.540	0.710
2400	0.1458	1.574	7.35	504.0	0.161	7.020	0.718
2500	0.1394	1.688	7.57	543.5	0.175	7.441	0.730

† Dari Natl. Bur. Stand (U. S.) Circ. 564, 1965

## LAMPIRAN 2

---

### TABEL EMISSIVITAS PERMUKAAN

Surface	Temperature, °F	Emissivity
Polished aluminum	73	0.040
Polished copper	242	0.023
Polished iron	800-1800	0.144-0.377
Cast iron, newly turned	72	0.435
Oxidized iron	212	0.736
Asbestos board	74	0.96
Red brick	70	0.93
Sixteen different oil paints, all colors	212	0.92-0.96
Water	32-212	0.95-0.963

## LAMPIRAN 3

### TABEL PROPERTIES

No	Formula	Name	MolWt	Tfp K	Tb K	Tc K	Pc bar	Vc cm <sup>3</sup> /mol	Zc	Omega	Dipm debye
476	C8H16	cyclonoctane	112.216	287.6	422.	647.2	35.6	410.	0.271	0.236	
477	C8H16	1-octene	112.216	171.4	394.4	566.7	26.2	464.	0.26	0.386	0.3
478	C8H16	2-octene-trans	112.216	185.4	398.1	580.	27.7			0.350	
479	C8H16O2	isoamyl propionate	144.214		433.4	611.					
480	C8H16O2	isobutyl butyrate	144.214		430.1	603.	24.5				
481	C8H16O2	isobutyl isobutyrate	144.214		421.8	594.	24.6				
482	C8H16O2	n-propyl isovalerate	144.214		429.1	609.					
483	C8H18	n-octane	114.232	216.4	398.8	568.8	24.9	492.	0.259	0.398	0.0
484	C8H18	2-methylheptane	114.232	164.	390.8	559.6	24.8	488.	0.261	0.378	
485	C8H18	3-methylheptane	114.232	152.7	392.1	563.7	25.5	464.	0.252	0.370	
486	C8H18	4-methylheptane	114.232	152.2	390.9	561.7	25.4	476.	0.259	0.371	
487	C8H18	2,2-dimethylhexane	114.232	152.	380.0	549.9	25.3	478.	0.264	0.338	
488	C8H18	2,3-dimethylhexane	114.232		388.8	563.5	26.3	468.	0.263	0.346	
489	C8H18	2,4-dimethylhexane	114.232		382.6	553.5	25.6	472.	0.262	0.343	
490	C8H18	2,5-dimethylhexane	114.232	181.9	382.3	550.1	24.9	482.	0.262	0.356	
491	C8H18	3,3-dimethylhexane	114.232	147.	385.1	562.0	26.5	443.	0.251	0.320	
492	C8H18	3,4-dimethylhexane	114.232		390.9	568.9	26.9	466.	0.265	0.338	
493	C8H18	3-ethylhexane	114.232		391.7	565.5	26.1	455.	0.252	0.361	
494	C8H18	2,2,3-trimethylpentane	114.232	160.9	383.0	563.5	27.3	436.	0.254	0.297	
495	C8H18	2,2,4-trimethylpentane	114.232	165.8	372.4	544.0	25.7	468.	0.266	0.303	
496	C8H18	2,3,3-trimethylpentane	114.232	172.5	387.9	573.6	28.2	455.	0.269	0.290	
497	C8H18	2,3,4-trimethylpentane	114.232	163.9	386.6	566.4	27.3	461.	0.267	0.315	
498	C8H18	2-methyl-3-ethylpentane	114.232	158.2	388.8	567.1	27.0	443.	0.254	0.330	
499	C8H18	3-methyl-3-ethylpentane	114.232	182.3	391.4	576.6	28.1	455.	0.267	0.303	
500	C8H18	2,2,3,3-tetramethylbutane	114.232	374.	379.6	567.8	28.7	461.	0.280	0.251	

## LAMPIRAN 4

### TABEL PROPERTIES-2

No	Formula	Name	MolWt	Tfp K	Tb K	Tc K	Pc bar	Vc cm <sup>3</sup> /mol	Zc	Omega	Dipm debye
551	C10H14	1-methyl-4-isopropylbenzene	134.222	200.	450.3	651.	27.3			0.373	0.0
552	C10H14	1,4-diethylbenzene	134.222	231.	456.9	657.9	28.0			0.404	0.1
553	C10H14	1,2,3,5-tetramethylbenzene	134.222	249.	471.2	679.					
554	C10H14	1,2,4,5-tetramethylbenzene	134.212	352.	470.0	675.	29.4			0.435	
555	C10H14O	thymol	150.221	323.	505.7	698.					
556	C10H15N	n-butylaniline	149.236	259.	513.9	721.	28.3				
557	C10H18	cis-decalin	138.254	230.	468.9	702.3	32.0			0.286	0.0
558	C10H18	trans-decalin	138.254	242.8	460.5	687.1	31.4			0.270	0.0
559	C10H18	1,3-decadiene	138.254		442.	615.					
560	C10H19N	caprylonitrile	153.269	255.3	516.	622.0	32.5				
561	C10H20	butylcyclohexane	140.260	198.4	454.1	667.	31.5			0.362	
562	C10H20	isobutylcyclohexane	140.270		444.5	659.	31.2			0.319	
563	C10H20	sec-butylcyclohexane	140.270		452.5	669.	26.7			0.264	
564	C10H20	tert-butylcyclohexane	140.270	232.0	444.7	659.	26.6			0.252	0.0
565	C10H20	1-decene	140.270	206.9	443.7	615.	22.0	650.	0.28	0.491	
566	C10H20O	menthol	156.269	316.	489.5	694.					
567	C10H22	n-decane	142.286	243.5	447.3	617.7	21.2	603.	0.249	0.489	0.0
568	C10H22	3,3,5-trimethylheptane	142.286		428.9	609.7	23.2			0.382	
569	C10H22	2,2,3,3-tetramethylhexane	142.286		433.5	623.2	25.1			0.364	
570	C10H22	2,2,5,5-tetramethylhexane	142.286		410.6	581.6	21.9			0.375	
571	C10H22O	1-decanol	158.285	280.1	506.1	687.	22.2	600.	0.230		1.8
572	C11H10	1-methylnaphthalene	142.201	242.7	517.9	772.	36.	462.	0.234	0.310	0.5
573	C11H10	2-methylnaphthalene	142.201	307.7	514.3	761.	35.	462.	0.26	0.382	0.4
574	C11H14O2	butyl benzoate	178.232	251.	523.	723.	26.	561.	0.25	0.58	
575	C11H16	pentamethylbenzene	148.249	327.5	504.6	719.					



## LAMPIRAN 5

### TABEL PROPERTIES-3

Physical Properties of Water (SI Units)<sup>a</sup>

Temperature (°C)	Density, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Specific Weight <sup>b</sup> , $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Dynamic Viscosity, $\mu$ (N·s/m <sup>2</sup> )	Kinematic Viscosity, $\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	Surface Tension <sup>c</sup> , $\sigma$ (N/m)	Vapor Pressure, $p_v$ [N/m <sup>2</sup> (abs)]	Speed of Sound <sup>d</sup> , $c$ (m/s)
0	999.9	9.806	1.787 E - 3	1.787 E - 6	7.56 E - 2	6.105 E + 2	1403
5	1000.0	9.807	1.519 E - 3	1.519 E - 6	7.49 E - 2	8.722 E + 2	1427
10	999.7	9.804	1.307 E - 3	1.307 E - 6	7.42 E - 2	1.228 E + 3	1447
20	998.2	9.789	1.002 E - 3	1.004 E - 6	7.28 E - 2	2.338 E + 3	1481
30	995.7	9.765	7.975 E - 4	8.009 E - 7	7.12 E - 2	4.243 E + 3	1507
40	992.2	9.731	6.529 E - 4	6.580 E - 7	6.96 E - 2	7.376 E + 3	1526
50	988.1	9.690	5.468 E - 4	5.534 E - 7	6.79 E - 2	1.233 E + 4	1541
60	983.2	9.642	4.665 E - 4	4.745 E - 7	6.62 E - 2	1.992 E + 4	1552
70	977.8	9.589	4.042 E - 4	4.134 E - 7	6.44 E - 2	3.116 E + 4	1555
80	971.8	9.530	3.547 E - 4	3.650 E - 7	6.26 E - 2	4.734 E + 4	1555
90	965.3	9.467	3.147 E - 4	3.260 E - 7	6.08 E - 2	7.010 E + 4	1550
100	958.4	9.399	2.818 E - 4	2.940 E - 7	5.89 E - 2	1.013 E + 5	1543

<sup>a</sup>Based on data from *Handbook of Chemistry and Physics*, 69th Ed., CRC Press, 1988.

<sup>b</sup>Density and specific weight are related through the equation  $\gamma = \rho g$ . For this table,  $g = 9.807 \text{ m/s}^2$ .

<sup>c</sup>In contact with air.

<sup>d</sup>From R. D. Blevins, *Applied Fluid Dynamics Handbook*. Van Nostrand Reinhold Co., Inc., New York, 1984.

