



UNIVERSITAS INDONESIA

**FENOMENA THERMOPHORESIS
DAN PEMANFAATANNYA SEBAGAI
THERMAL PRECIPITATOR UNTUK MENINGKATKAN
KEBERSIHAN UDARA**

DISERTASI

IMANSYAH IBNU HAKIM
0606037481

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**FENOMENA THERMOPHORESIS
DAN PEMANFAATANNYA SEBAGAI
THERMAL PRECIPITATOR UNTUK MENINGKATKAN
KEBERSIHAN UDARA**

DISERTASI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor

IMANSYAH IBNU HAKIM

0606037481

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

PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Imansyah/Ibnu Hakim

NPM : 0606037481

Tanda Tangan : 

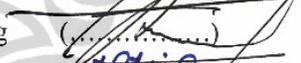
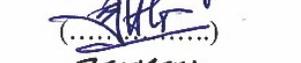
Tanggal : 23 Mei 2012

LEMBAR PENGESAHAN

Disertasi ini diajukan oleh :
Nama : Imansyah Ibnu Hakim
NPM : 0606037481
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Disertasi : Fenomena Thermophoresis dan Pemanfaatannya
Sebagai Thermal Precipitator Untuk Meningkatkan
Kebersihan Udara

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

DEWAN PENGUJI

Promotor : Prof.Dr.Ir. Bambang Suryawan, MT 
Ko-Promotor : Prof.Dr.Ir. I Made Kartika Dhiputra, Dipl.-Ing 
: Prof.Dr.-Ing. Ir. Nandy Setiadi Djaja Putra 
Tim Penguji : Prof. Dr.Ir. Bambang Sugiarto, MEng 
: Dr.Ir. Warjito, MEng 
: Prof.Dr.Ir. Indarto, DEA 
: Prof.Dr.Ir. Bambang Teguh Prasetyo, Dipl.Ing., DEA 
: Dr.Ir. Harinaldi, MEng 

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 23 Mei 2012

KATA PENGANTAR

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

- (1) Prof.Dr.Ir. Bambang Suryawan, MT. selaku promotor
- (2) Prof.Dr.Ir. I Made Kartika Dhiputra, Dipl.-Ing. selaku co-promotor
- (3) Prof.Dr.-Ing Nandy Putra selaku co-promotor
- (4) Rekan-rekan sejawat DTM, terima kasih atas spirit dan doanya. Wabillkhusus Bapak M. Idrus Alhamid yang tidak pernah bosan mengingatkan saya, terima kasih atas segalanya. Pak Engkos, di saat semangat saya menurun, andalah orang yang memberikan semangat baru buat saya, terima kasih Kang.
- (5) Rekan-rekan dari Universiti Tun Hussein Onn (UTHM) Malaysia, pengalaman yang tak terlupakan saat bulan Ramadhan, saat berbuka dan sahur tidak pernah ketinggalan yang namanya roti canay dan teh tarik.
- (6) Para mahasiswa bimbingan saya, terima kasih atas bantuannya.
- (7) Isteri, anak-anak, bapak, dan ibu, luar biasa sekali perhatiannya, doanyapun tidak pernah putus. Sekali lagi terima kasih atas segalanya.

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

Depok, 23 Mei 2012



Imansyah Ibnu Hakim

**LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Imansyah Ibnu Hakim
NPM : 0606037481
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Disertasi

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 :

*Fenomena Thermophoresis dan Pemanfaatannya Sebagai Thermal Precipitator
Untuk Meningkatkan Kebersihan Udara*

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 23 Mei 2012

Yang menyatakan



(Imansyah Ibnu Hakim)

Imansyah Ibnu Hakim NPM 0606037481 Program Studi Teknik Mesin	Promotor Prof.Dr.Ir. Bambang Suryawan, MT Co-Promotor Prof.Dr.Ir. I Made Kartika Dhiputra, Dipl.-Ing Prof.Dr.-Ing. Ir. Nandy Setiadi Djaja Putra
---	--

**FENOMENA THERMOPHORESIS DAN PEMANFAATANNYA
SEBAGAI THERMAL PRECIPITATOR UNTUK
MENINGKATKAN KEBERSIHAN UDARA**

ABSTRAK

Kondisi pencemaran udara khususnya di kota-kota besar sudah sangat memprihatinkan. Salah satu penyebab pencemaran udara adalah polusi yang disebabkan oleh aerosol smoke. Aerosol smoke yang memiliki partikel berukuran submicron (0,01 – 5 μm) banyak dijumpai pada asap rokok, asap kendaraan bermotor diesel, asap dari industri-industri, dan lain-lain. Tentunya kondisi ini akan bertambah parah dengan bertambahnya jumlah penduduk perokok, bertambahnya jumlah kendaraan bermotor dan industri. Oleh karena itu perlu diupayakan penanggulangan pencemaran udara tersebut. Pada studi literatur didapatkan bahwa metode penyaringan udara dari partikel-partikel halus yang berukuran 0,01 – 5 μm adalah dengan menggunakan thermal precipitator. Thermal precipitator adalah salah satu tipe penyaringan udara berbasis thermophoretic force. Thermophoresis adalah fenomena dimana aerosol partikel yang berada di antara dua buah plat akan bergerak ke arah yang memiliki temperatur yang lebih rendah. Jadi bila ada perbedaan temperatur antara dua buah plat, maka akan menimbulkan gaya dan partikel-partikel yang berada di antara kedua plat tersebut akan bergerak menuju ke daerah yang memiliki temperatur yang lebih rendah akibat gaya tersebut.

Dalam rangka upaya membantu pengendalian dan mengurangi pencemaran udara, maka pada penelitian ini dibuat suatu alat uji thermal precipitator untuk mendepositkan partikel-partikel yang ada di dalam udara dengan memanfaatkan gaya thermophoretic. Gaya tersebut adalah gaya yang diberikan kepada partikel yang tersuspensi di suatu aliran udara. Langkah pertama yang dilakukan adalah membuat alat eksperimen baik untuk plat vertikal maupun plat horisontal. Simulasi thermophoresis juga dilakukan untuk mengklarifikasi hasil eksperimen. Setelah didapat data yang akurat dan tepat, dibuatlah thermal precipitator. Spesifikasi dari thermal precipitator adalah sebagai berikut : perbedaan temperatur antara kedua plat di set pada $\Delta T=5, 10, 15, \text{ dan } 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Jarak antar plat panas dan dingin adalah 5 mm. Jenis aerosol smoke yang digunakan adalah dari tobacco smoke. Untuk melihat karakterisasi dari thermal precipitator digunakan gas sensor dan partikel counter. Dari hasil eksperimen alat uji thermal precipitator, terbukti bahwa thermal precipitator ini dapat digunakan sebagai smoke collector dengan fraksi deposit rata-rata 0,56.

Kata kunci : Termoporesis, partikulat asap, kualitas udara bersih, thermal precipitator

Imansyah Ibnu Hakim NPM 0606037481 Program Studi Teknik Mesin	Promotor Prof.Dr.Ir. Bambang Suryawan, MT Co-Promotor Prof.Dr.Ir. I Made Kartika Dhiputra, Dipl.-Ing Prof.Dr.-Ing. Ir. Nandy Setiadi Djaja Putra
---	--

THERMOPHORESIS PHENOMENON AND ITS APPLICATION AS THE THERMAL PRECIPITATOR TO ENHANCE THE CLEAN AIR

ABSTRACT

Air pollution in major cities in many countries has reaching a very concerning level one of the cause of air pollution is pollution cause by smoke aerosol. Smoke aerosols that has an average particle diameter of $0.1 \mu\text{m} - 1 \mu\text{m}$ can be found in cigarette smoke, diesel vehicle fume, industrial fume and many else. This condition will be worsen by the increase in the number of smokers, motor vehicles and industry. Therefore we need to pursue the control method for that kind of air pollution. In the literature study, it's found that the cleaning method of air filtration for fine particle with dimension of $0.01 - 5 \mu\text{m}$ are by using thermal precipitator. Thermal precipitator is one method of air filtration based on thermophoretic force. Thermophoresis is a phenomenon in which aerosol particle migrate in the direction decreasing temperature. So, if there is a temperature difference between two plates, it will cause the force that will push the particles between the two plates toward the plate that have lower temperature.

In the effort to help control and reduce the air pollution, for this study we made a thermal precipitator test equipment to deposit the particles in the air with the use of thermophoretic force. That force is the force applied to the particles that suspended in the fluid flow. The first step is to be done is making an experimental apparatus for vertical plate and horizontal plate. The thermophoresis phenomenon simulation was carried out too. This simulation is to clarify the experimental result. After got the accuracy data and then making an aerosol thermal precipitator. The aerosol thermal precipitator specification is the temperature difference between two plates is set at $\Delta T=5, 10, 15, \text{ and } 20 \text{ }^\circ\text{C}$. The distance between hot and cold plat is 5 mm. For the aerosol smoke we use the tobacco smoke. This study utilized gas sensors to observe the characterization of thermal precipitator. From the experiment and analysis can be concluded that thermal precipitator can be applied as a smoke collector with 0.65 deposit fraction in average.

Keywords : Thermophoresis, smoke particulate, indoor air quality, aerosol thermal precipitator

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR NOTASI	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
1. PENDAHULUAN	1
1.1. LATAR BELAKANG	1
1.2. PERUMUSAN MASALAH	6
1.3. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN	6
1.4. BATASAN MASALAH	6
1.5. METODOLOGI PENELITIAN	7
1.6. SISTEMATIKA PENULISAN	7
2. TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1. FENOMENA THERMOPHORESIS	9
2.2. DEFINISI AEROSOL	11
2.2.1 Emisi Karbon Monoksida (CO)	12
2.2.2 Nitrogen Oksida (NO _x)	12
2.2.3 SO _x (Sulfur Oxide : SO ₂ , SO ₃)	13
2.2.4 Emisi HydroCarbon (HC)	13
2.2.5 Partikulat Matter (PM)	13
2.3. GAYA-GAYA YANG MEMPENGARUHI PERGERAKAN PARTIKEL	14
2.3.1. Konveksi Alamiah	14

2.3.2. Gaya Gravitasi (<i>Gravity Force</i>)	18
2.3.3. Gaya Apung (<i>Buoyancy Force</i>)	19
2.3.4. Gaya Angkat Saffman (<i>Saffman Lift Force</i>)	19
2.3.5. Gaya Elektrostatis (<i>Electrostatic Force</i>)	20
2.3.6. Gerak Acak Brownian (<i>Brownian Motion</i>)	22
2.4. ANALISA NON DIMENSIONAL	23
3. METODE PENELITIAN	30
3.1. TAHAPAN PENELITIAN	30
3.2. PENGUJIAN FENOMENA THERMOHORESIS DENGAN MENGUNAKAN PLAT VERTIKAL DAN HORIZONTAL SECARA VISUAL	31
3.2.1. Plat Vertikal	31
3.2.2. Plat Horizontal	41
3.3. SIMULASI FENOMENA THERMOPHORESIS	44
3.4. PENGEMBANGAN THERMAL PRECIPITATOR	50
3.4.1. Metode Pengukuran	52
4. PEMBAHASAN	58
4.1. HASIL UJI FENOMENA THERMOPHORESIS PLAT VERTIKAL	
4.1.1. Tebal Lapisan Batas Temperatur	58
4.1.2. Kalibrasi Termokopel	59
4.1.3. Hasil Pengujian Plat Vertikal	60
4.2. HASIL UJI FENOMENA THERMOPHORESIS PLAT HORIZONTAL	69
4.2.1. Tebal Lapisan Batas Temperatur	69
4.2.2. Hasil Pengujian Plat Horizontal	73
4.3. HASIL SIMULASI FENOMENA THERMOPHORESIS	79
4.4. PENGEMBANGAN THERMAL PRECIPITATOR	85
4.5. PENGARUH RADIASI TERHADAP THERMOPHORESIS ..	91
5. KESIMPULAN DAN SARAN	94
DAFTAR ACUAN	95
LAMPIRAN	100

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Aerosol smoke berasal dari asap industri	2
Gambar 1.2.	Aerosol smoke berasal dari asap kendaraan bermotor...	2
Gambar 1.3.	Aerosol smoke berasal dari asap rokok	2
Gambar 1.4.	Ukuran dan karakter partikel serta metode Pembersihannya	3
Gambar 1.5.	Range ukuran partikel dan definisi aerosol	7
Gambar 2.1.	Fenomena Thermophoresis	9
Gambar 2.2.	Fenomena gaya thermophoretic pada plat vertical (a) dan plat horizontal (b)	10
Gambar 2.3.	Lapisan Batas di atas plat-rata vertikal	15
Gambar 2.4.	Gaya angkat Saffman pada partikel	20
Gambar 2.5.	Skema electrostatic force	21
Gambar 2.6.	Grafik V terhadap E	21
Gambar 2.7.	Pergerakan partikel pada umumnya	22
Gambar 3.1.	Skema Tahapan Penelitian Thermophoresis	30
Gambar 3.2.	Skema Alat Uji Thermophoresis Fenomena	31
Gambar 3.3.	Photo Alat Uji Thermophoresis	32
Gambar 3.4.	Bejana vakum tanpa baut dan karet packing	33
Gambar 3.5.	Bejana vakum pada kondisi terpasang pada alat uji	33
Gambar 3.6.	Plat stainless steel di dalam bejana vakum	34
Gambar 3.7.	Elemen pemanas	35
Gambar 3.8.	Data Akuisisi DT 9806	37
Gambar 3.9.	Voltage regulator	38
Gambar 3.10.	Video kamera	39
Gambar 3.11.	Tampilan Menu Capture pada Pinnacle Studio Plus V6 .	40
Gambar 3.12.	Partikel Feeder	40
Gambar 3.13.	Skema pengujian thermophoresis plat horizontal (side view)	41
Gambar 3.14.	Skema pengujian thermophoresis plat horizontal (top view)	41

Gambar 3.15.	Skema simulasi thermophoresis	44
Gambar 3.16.	Prosedur simulasi Fluent	45
Gambar 3.17.	Langkah simulasi Fluent, import grid	47
Gambar 3.18.	Langkah simulasi Fluent, pemilihan model solver	47
Gambar 3.19.	Langkah simulasi Fluent, discrete phase modeling	48
Gambar 3.20.	Input data udara	48
Gambar 3.21.	Input data partikel	49
Gambar 3.22.	Input data plat panas	49
Gambar 3.23.	Input data plat dingin	49
Gambar 3.24.	Skema alat uji thermal precipitator	50
Gambar 3.25.	Test Section and gas sensor	51
Gambar 3.26.	Photo alat uji thermal precipitator	52
Gambar 3.27.	Gas sensor Figaro 2600	53
Gambar 3.28.	Ilustrasi penyerapan oksigen oleh sensor	53
Gambar 3.29.	Ilustrasi ketika terdeteksi adanya gas	54
Gambar 3.30.	Grafik hubungan antara R_{gas}/R_{air} Vs gas concentration	55
Gambar 3.31.	Photo gas sensor, mikrokontroler, dan display	55
Gambar 3.32.	Grafik kalibrasi gas sensor menjadi pt/cc	57
Gambar 4.1.	Photo SEM fly ash	60
Gambar 4.2.	Pergerakan Fly Ash ke Plat Dingin diukur dari center pada $L=40$ mm	62
Gambar 4.3.	Pergerakan Fly Ash ke Plat Dingin diukur dari center pada $L=45$ mm	64
Gambar 4.4.	Pergerakan Fly Ash ke Plat Dingin diukur dari center pada $L= 50$ mm	66
Gambar 4.5.	Pergerakan partikel ke plat dingin diukur dari center pada $\Delta T = 0$ °C, $L = 50$ mm	68
Gambar 4.6.	Grafik Distribusi temperatur pada jarak $x = 10$ cm	70
Gambar 4.7.	Grafik Distribusi temperatur pada jarak $x = 20$ cm	70
Gambar 4.8.	Grafik perbandingan nilai antara bilangan Grashof dengan bilangan Reynolds Kuadrat	72

Gambar 4.9. Grafik perbandingan jumlah partikel per million (ppm) untuk plat panas di atas.....	74
Gambar 4.10. Grafik perbandingan jumlah partikel per million (ppm) untuk plat panas di bawah.....	76
Gambar 4.11. Photo pengamatan secara visual plat horizontal	77
Gambar 4.12. Photo pengamatan secara visual plat vertikal	77
Gambar 4.13. Photo pengamatan secara visual oleh A. Messere	78
Gambar 4.14. Pergerakan partikel pada $\Delta T = 0$ K, plat panas di atas	80
Gambar 4.15. Pergerakan partikel pada $\Delta T = 200$ K, plat panas di atas	80
Gambar 4.16. Grafik simulasi thermophoresis plat panas di atas	82
Gambar 4.17. Grafik simulasi thermophoresis plat panas di bawah ...	83
Gambar 4.18. Hasil Penelitian Iman Zahmatkesh [2008]	84
Gambar 4.19. Partikel yang terdeposit pada $T^*=0$	86
Gambar 4.20. Partikel yang terdeposit pada $T^*=0,17$ atau $\Delta T=5$ °C ..	88
Gambar 4.21. Partikel yang terdeposit pada $T^*=0,29$ atau $\Delta T=10$ °C ..	89
Gambar 4.22. Partikel yang terdeposit pada $T^*=0,38$ atau $\Delta T=15$ °C ..	89
Gambar 4.23. Partikel yang terdeposit pada $T^*=0,44$ atau $\Delta T=20$ °C ..	90

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Parameter Analisa Dimensional	24
Tabel 3.1.	Spesifikasi Aerosol Smoke	43
Tabel 3.2.	Sifat Fisik Udara untuk Simulasi	45
Tabel 4.1.	Spesifikasi Fly Ash	60
Tabel 4.2.	Pergerakan Partikel pada Jarak Antar Plat, L = 40 mm	61
Tabel 4.3.	Pergerakan Partikel pada Jarak Antar Plat, L = 45 mm	63
Tabel 4.4.	Pergerakan Partikel pada Jarak Antar Plat, L = 50 mm	65
Tabel 4.5.	Pergerakan Partikel pada Jarak Antar Plat, L = 50 mm, $\Delta T = 0^{\circ}\text{C}$	67
Tabel 4.6.	Perbandingan bilangan Grashof dengan bilangan Reynolds kuadrat	72
Tabel 4.7.	Penurunan jumlah ppm untuk plat panas di atas.....	74
Tabel 4.8.	Penurunan jumlah ppm untuk plat panas di bawah.....	75
Tabel 4.9.	Data Simulasi Jarak antar Plat 5 mm	81
Tabel 4.10.	Jumlah partikel yang terdeposit	85

DAFTAR NOTASI

A	luasan (m^2)
F	<i>thermophoretic force</i> (N)
g	percepatan gravitasi (m/s^2)
h	koefisien transfer kalor konveksi ($W/m^2 K$)
k	konduktifitas thermal ($W/m K$)
L	jarak antar plat 1 (<i>hot plate</i>) dan plat 2 (<i>cold plate</i>) (mm)
q	energi kalor (W)
T	temperatur ($^{\circ}C$)
C _p	kalor spesifik ($J/kg K$)
E _b	energi radiasi persatuan luas <i>blackbody</i> (W/m^2)
T _s	temperatur absolut dari permukaan (K)

Greeks

β	ekspansi termal volumetrik (K^{-1})
ΔT	beda temperatur antara plat 1 (<i>hot plate</i>) dengan plat 2 (<i>cold plate</i>) ($^{\circ}C$)
Δx	beda jarak (m)
μ	viskositas dinamik (Ns/m^2)
ρ	<i>density</i> (kg/m^3)
σ	konstanta <i>Stefan Boltzmann</i> ($W/m^2 K$)
ν	Viskositas kinematik (kg/ms)
λ	jarak tempuh partikel (m)
δ	thermal boundary layer (m)

Group non dimensional

$$Gr = \frac{g\beta(\Delta T)L^3}{\nu^2}$$

Bilangan Grashof

$$Pr = \frac{C_p\mu}{k}$$

Bilangan Prandtl

$$N_u = \frac{h.L}{k}$$

Bilangan Nusselt

$$Ra = Gr.Pr$$

Bilangan Rayleigh

$$R_e = \frac{\rho v.L}{\mu}$$

Bilangan Reynolds

$$Kn = 2\lambda/Dp$$

Bilangan Knudsen



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Characteristics Particulate Matter	100
Lampiran 2 TGS 2600 data sheet	101
Lampiran 3 Skema microcontroller	102
Lampiran 4 Kalibrasi Termokopel	104



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Pencemaran/polusi udara adalah kehadiran satu atau lebih substansi fisik, kimia, atau biologi di atmosfer dalam jumlah yang dapat membahayakan kesehatan makhluk hidup, mengganggu estetika dan kenyamanan, atau merusak properti. Polusi udara adalah masuknya atau tercampurnya unsur-unsur berbahaya ke dalam atmosfer yang dapat mengakibatkan terjadinya kerusakan lingkungan, gangguan pada kesehatan manusia secara umum serta menurunkan kualitas lingkungan.

Pencemaran udara di kota-kota besar sudah sangat memprihatinkan. Begitu juga yang terjadi di Indonesia, khususnya di Propinsi Daerah Khusus Ibukota Jakarta, yang menjadi barometer kota-kota lainnya di Indonesia, telah mencapai tingkat yang memprihatinkan sehingga menyebabkan turunnya kualitas udara dan daya dukung lingkungan. Salah satu penyebab pencemaran udara adalah polusi yang disebabkan oleh *aerosol smoke*. *Aerosol smoke* yang memiliki partikel berukuran *submicron* (0,01 – 5 μm) banyak dijumpai pada asap rokok, asap kendaraan bermotor diesel, asap dari industri-industri, dan lain-lain seperti terlihat pada **Gambar 1.1.**, **1.2.**, dan **1.3.** Upaya penanggulangan pencemaran udara hanya sebatas himbauan melalui pamflet dan spanduk. Sebagai contoh adalah langkah yang dilakukan oleh pemerintah dengan mengeluarkan PERDA Gubernur DKI Jakarta Nomor 75 Tahun 2005 tentang Kawasan Larangan Merokok, Peraturan Pemerintah Nomor 19 Tahun 2003 tentang Pengamanan Rokok Bagi Kesehatan, dan PERDA Propinsi DKI Jakarta Nomor 2 Tahun 2005 tentang Pengendalian Pencemaran Udara, boleh dibilang tidak memberikan dampak yang signifikan.

Thermophoresis memegang peranan penting dalam mekanisme pergerakan partikel berukuran submicron pada teknologi aerosol. Fenomena *thermophoresis* menggambarkan pergerakan partikel yang disebabkan oleh adanya perbedaan temperatur di sekeliling partikel tersebut. Apabila ada perbedaan temperatur antara dua buah region (plat misalnya), maka akan menimbulkan gaya dan partikel-partikel yang berada di antara kedua plat akan bergerak menuju ke

daerah/plat yang memiliki temperatur yang lebih rendah. Efek dari *thermophoresis* ini pertama kali diteliti oleh Tyndal pada tahun 1870 dan Aitken pada tahun 1884. Para peneliti tersebut mengklarifikasi bahwa partikel-partikel akan bergerak dari permukaan panas menuju ke permukaan dingin. Hal ini terjadi karena adanya gaya yang disebabkan oleh perbedaan temperatur (*temperature difference*). Arah gaya tersebut akan mengarah ke daerah yang memiliki temperatur yang lebih rendah. Fenomena ini yang sekarang dikenal dengan istilah *thermophoresis*.



Gambar 1.1. *Aerosol smoke* berasal dari asap industri

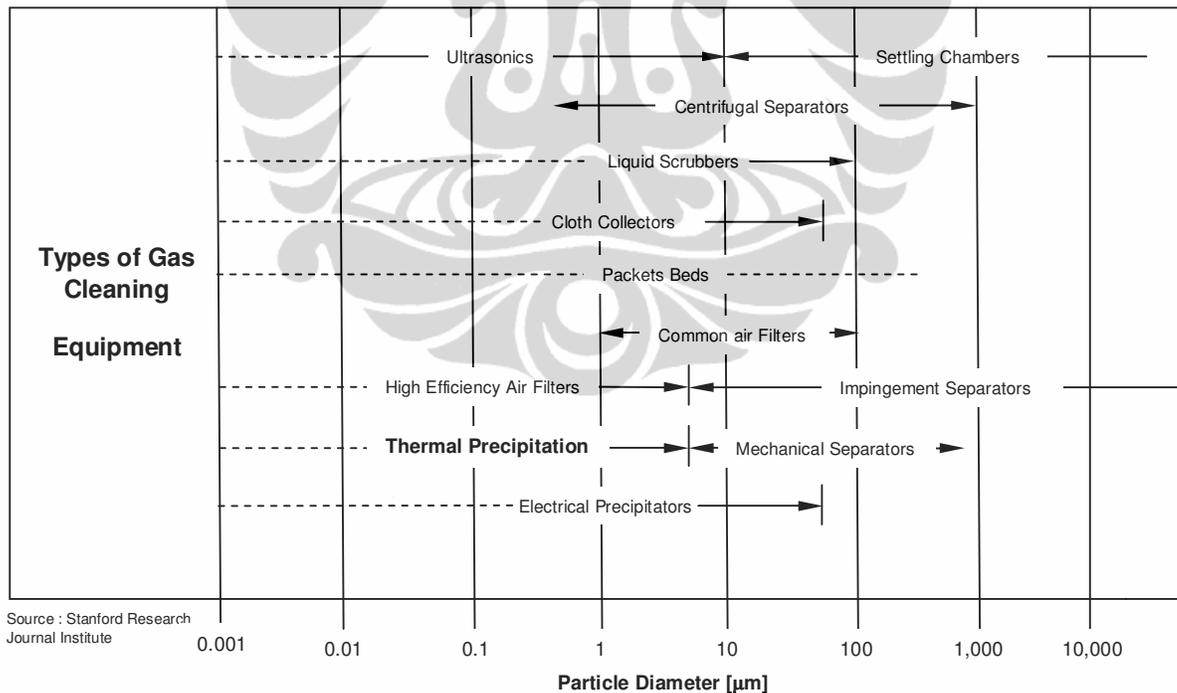


Gambar 1.2. *Aerosol smoke* berasal dari asap kendaraan bermotor



Gambar 1.3. *Aerosol smoke* berasal dari asap rokok

Aerosol smoke juga dijumpai pada peralatan-peralatan penukar kalor (*heat exchangers*), yaitu abu terbang (*fly ash*) yang dihasilkan dari proses pembakaran batubara pada sistem pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Abu terbang yang tersuspensi dalam aliran gas temperatur tinggi akan masuk ke *superheater* dan *economizer*. Abu terbang (partikel) yang berukuran kecil (1 – 5 μm) akan menempel di dinding pipa *superheater* dan *economizer* sehingga akan membentuk lapisan deposit/fouling. Sedangkan *fly ash* yang berukuran 10 – 100 μm akan terus melewati *superheater* dan *economizer* yang kemudian akan ditangkap oleh *Electrostatic Precipitator* (EP). Lapisan deposit yang terbentuk di dinding pipa alat penukar kalor ini tentunya akan mengurangi koefisien perpindahan kalor. Deposit yang terjadi pada peralatan penukar kalor diteliti oleh Nishio et.al. (1974), beliau menyimpulkan bahwa *driving force* deposit/fouling ini adalah karena adanya fenomena *thermophoresis*. Hal yang sama juga dilakukan oleh Byers et.al. (1969), and Romay et.al. (1998).



Gambar 1.4. Ukuran dan karakter partikel serta metode pembersihannya

Stanford Research Journal Institute (Gambar 1.4) pada tahun 1961 menyatakan bahwa metode pembersihan partikel yang berdimensi 0,01 – 5 μm

adalah dengan menggunakan metode *thermal precipitation* yaitu pemisahan partikel dengan menggunakan/memanfaatkan gaya *thermophoretic* (*thermophoretic force*).

Fenomena *thermophoresis* pada aliran laminar dalam tabung telah diteliti secara menyeluruh oleh beberapa peneliti. Stratmann et.al (1989) melakukan penelitian tentang *thermophoretic deposition* secara eksperimen dengan menggunakan partikel *monodisperse* berukuran 0,005 – 0.1 μm pada aliran laminar dalam tabung. Kemudian Montassier et.al. (1990) melakukan percobaan dengan *experimental set-up* yang mirip dengan Stratmann et.al. kecuali arah aliran dan teknik pengukuran yang berbeda.

Aerosol smoke akan dijumpai juga pada sistem pipa gas buang kendaraan bermotor, khususnya kendaraan bermotor berbahan bakar solar (mesin diesel). Fenomena *thermophoresis* pada sistem pipa gas buang juga diteliti oleh beberapa peneliti. A. Messerer, et.al pada tahun 2003 memanfaatkan *thermophoresis* untuk mendepositkan *soot aerosol particles* pada sistem gas buang pada mesin diesel. Byung Uk Lee, et.al pada tahun 2006 melakukan penelitian yang hampir serupa dengan A. Messerer. Para peneliti tersebut menyimpulkan bahwa pada sistem pipa gas buang kendaraan bermotor, *thermophoresis* adalah faktor yang dominan terjadinya deposit untuk partikel berukuran 0,02 – 0,05 μm . Kemudian pada tahun 2008 Zhou Tao et.al melakukan eksperimen secara visual untuk membuktikan bahwa *thermophoresis* memiliki pengaruh yang besar terjadinya deposit untuk partikel berukuran 6 μm , namun kecil sekali pengaruhnya untuk partikel berukuran lebih besar dari 30 μm .

Gallis M.A., et.al. pada tahun 2004 melakukan penelitian pendekatan *thermophoretic force* pada partikel bebas. *Thermophoretic force* dapat dimanfaatkan sebagai *thermal precipitator* yang dapat diaplikasikan secara lebih luas dalam kehidupan, khususnya untuk pengendalian pencemaran udara. Hal yang sama juga diteliti oleh Gonzales D. et.al pada tahun 2005. Bahkan Gonzales melakukan penelitian dengan menggunakan aerosol partikel berukuran nanometer.

K.K. Dinesh et.al. (2009) meneliti deposit/fouling yang terjadi akibat *thermophoretic force* pada aliran konveksi alami dengan menggunakan plat paralel, salah satu plat tersebut diberikan sumber panas (*heater*). Sebelumnya

pada tahun 2007, Adrian Postelnicu telah melakukan penelitian pengaruh *thermophoresis* terhadap deposit partikel juga aliran konveksi alami dengan menggunakan plat datar horisontal. Para peneliti tersebut menyimpulkan bahwa *thermophoretic force* merupakan faktor yang dominan terjadinya deposit partikel.

Fenomena *thermophoresis* ini tidak hanya diteliti secara eksperimen. Brock (1962) mengawali penelitian tentang *thermophoresis* secara teoritis. Kemudian D.P. Healy et.al. pada tahun 2010 tidak hanya secara eksperimental, penelitian deposit partikel yang disebabkan oleh *thermophoresis* pada aliran dalam pipa diteliti secara teoritis.

Peneliti lain melakukan investigasi gaya-gaya yang mempengaruhi pergerakan partikel. Mereka melakukan pembuktian apakah ada faktor lain yang mempengaruhi pergerakan partikel. Chi-Chang Wang (2006) meneliti efek *thermophoresis* dan gaya inersia serta kombinasi dari keduanya terhadap deposit partikel pada permukaan yang bergelombang. Peneliti-peneliti lain seperti Iman Zahmatkesh (2008) membagi mekanisme terjadinya deposit menjadi 3 (tiga) bagian, yaitu untuk ukuran partikel $\sim 100 \mu\text{m}$ disebabkan oleh *inertial impaction*, yang kedua untuk ukuran partikel $\sim 10 \mu\text{m}$ *thermophoresis* sangat dominan, dan yang terakhir *brownian diffusion* sangat besar kontribusinya untuk ukuran $\sim 10 \text{nm}$. Sedangkan Changfu You (2010) meneliti efek/pengaruh dari medan elektrostatis dan *thermophoresis* serta kombinasi keduanya pada partikel yang terhirup (*inhalable particulate matter*). Dengan meningkatnya perbedaan temperatur antara temperatur gas dan dinding dingin, maka efek/pengaruh elektrostatis dan *thermophoresis* sangat signifikan, khususnya untuk ukuran partikel di bawah $1 \mu\text{m}$. R. Tsai et.al. (2010) juga melakukan studi efek/pengaruh *thermophoresis* dan *electrophoresis* terhadap deposit partikel pada plat vertikal. Penelitian tersebut memberikan analisis yang lebih baik untuk memahami dampak dari *thermophoresis* dan *electrophoresis* pada fenomena deposit partikel di sepanjang dinding vertikal melalui media berpori. Hal ini sangat membantu untuk mengendalikan kualitas udara dalam ruangan dan pengembangan teknologi aerosol partikel.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Penelitian tentang fenomena *thermophoresis* sudah banyak dilakukan. Secara keseluruhan dari hasil penelitian tersebut mengatakan bahwa *thermophoresis* menjadi *driving force* terjadinya deposit partikel khususnya untuk partikel yang berukuran 0,1 – 5 μm . Namun belum ada data penelitian tentang *thermal precipitator*, yaitu alat yang digunakan sebagai *smoke collector* yang berbasis *thermophoresis*. Oleh karena itu peneliti ingin melakukan studi eksperimen suatu alat uji *thermal precipitator* untuk mendepositkan partikel-partikel yang ada di dalam udara dengan memanfaatkan gaya *thermophoretic*. Penelitian ini dilakukan dalam upaya untuk membantu mengendalikan dan mengurangi pencemaran udara. Langkah awal yang harus dilakukan adalah menginvestigasi dan mengkarakterisasi *thermal precipitator*.

1.3 TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

Tujuan dan manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Melakukan kajian/penelitian terhadap fenomena *thermophoresis* yang mempunyai peran besar terjadinya deposit partikel.
- Mencari korelasi/hubungan antara *thermophoretic force* dengan parameter-parameter gaya lain yang mempengaruhi pergerakan partikel.
- Mengembangkan *thermal precipitator* (alat mengumpulkan partikel) yang berbasis *thermophoresis*.

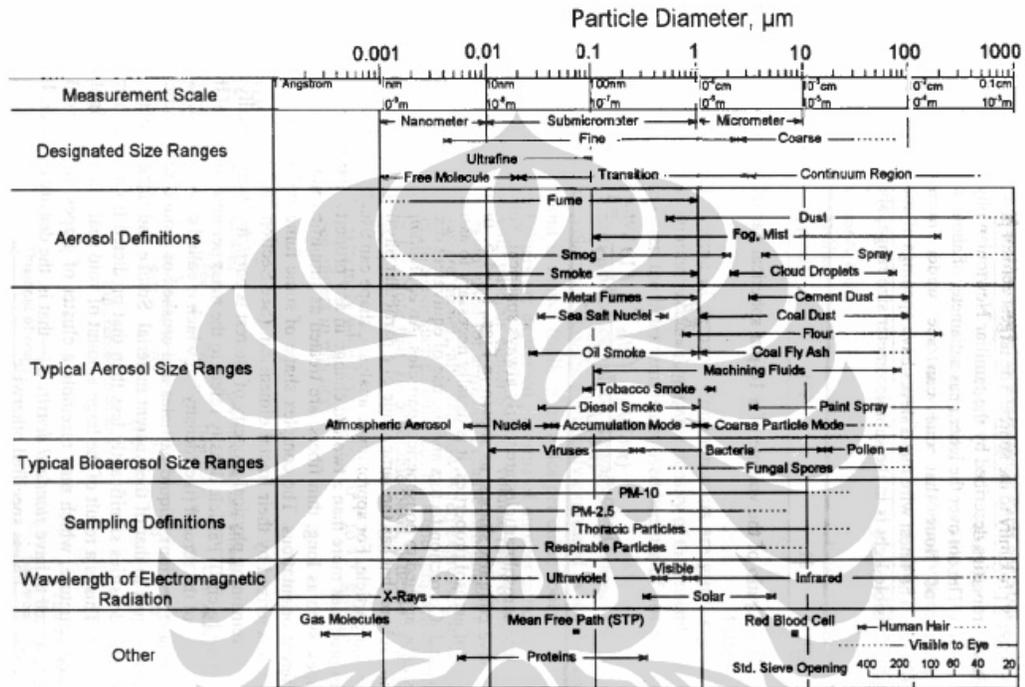
1.4 BATASAN MASALAH

Peneliti mengacu pada **Gambar 1.4.** bahwa *thermophoretic force* akan sangat berpengaruh untuk partikel berukuran 0,01 ~ 10 μm . Pembagian jenis *aerosol smoke* yang diterbitkan oleh Hinds [1999] seperti terlihat pada **Gambar 1.5.** untuk ukuran partikel 0,01 ~ 10 μm adalah sebagai berikut :

- *Metal fumes*
- *Oil smoke*
- *Tobacco smoke*
- *Diesel smoke*

- *Viruses, etc*

Oleh karena itu peneliti membatasi penelitian tentang *thermal precipitator* ini untuk tipe *aerosol smoke* yang berukuran 0,01 ~ 10 μm khususnya *tobacco smoke*.



Gambar 1.5. Range ukuran partikel dan definisi aerosol

1.5 METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian lebih detail dijelaskan pada BAB 3 dalam disertasi ini.

1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Mengacu kepada Surat Keputusan Rektor Universitas Indonesia Nomor : 628/SK/R/UI/2008 tentang Pedoman Teknis Penulisan Tugas Akhir Mahasiswa Universitas Indonesia, sistematika penulisan disertasi adalah sebagai berikut :

HALAMAN JUDUL

LEMBAR PENGESAHAN

KATA PENGANTAR

LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH

ABSTRAK

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR

DAFTAR TABEL

DAFTAR NOTASI

DAFTAR LAMPIRAN

1. PENDAHULUAN

- 1.1. Latar Belakang
- 1.2. Perumusan Masalah
- 1.3. Tujuan dan Manfaat Penelitian
- 1.4. Batasan Masalah
- 1.5. Metodologi Penelitian
- 1.6. Sistematika Penulisan

2. TINJAUAN PUSTAKA

3. METODE PENELITIAN

4. PEMBAHASAN

5. KESIMPULAN DAN SARAN

DAFTAR ACUAN

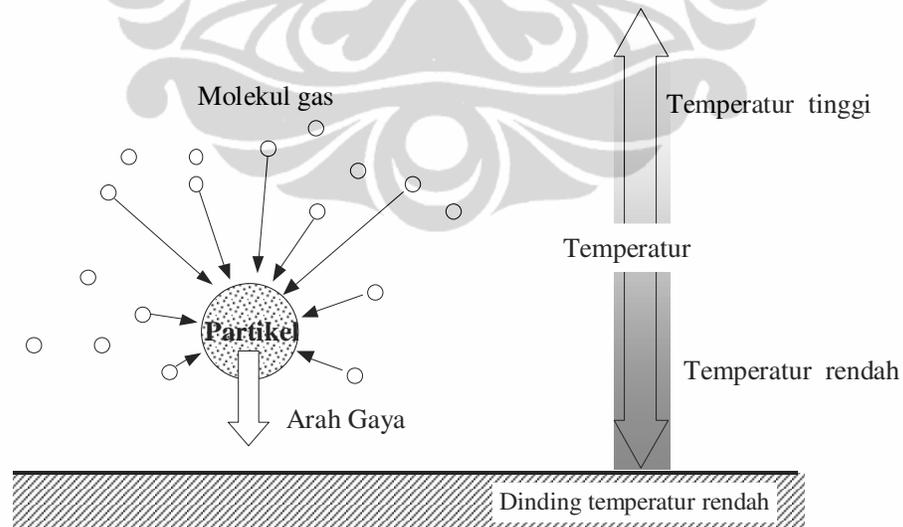
LAMPIRAN

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. FENOMENA THERMOPHORESIS

Thermophoresis adalah sebuah fenomena di mana bila terdapat gradien temperatur dalam gas/udara akan menyebabkan partikel yang tersuspensi di dalamnya bergerak menuju daerah yang memiliki temperatur yang lebih rendah. Fenomena *thermophoresis* ini secara ilustrasi dapat dilihat pada **Gambar 2.1.** dan **Gambar 2.2.**

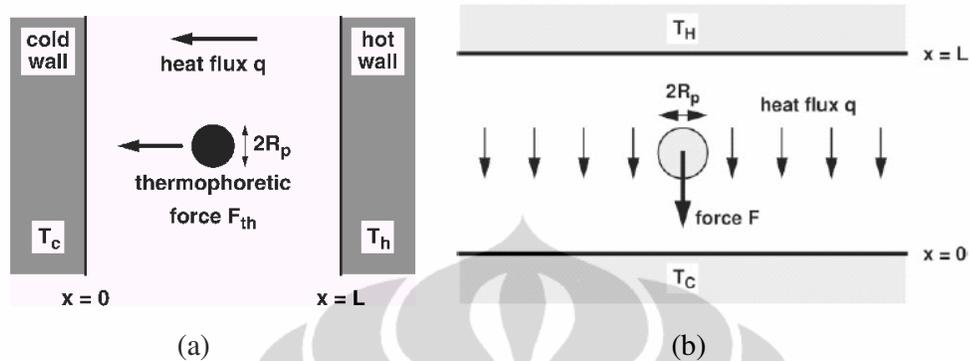
Pengetahuan tentang *thermophoresis* baik secara teoritis maupun eksperimen sangat menarik karena banyak aplikasinya di industri maupun penelitian di laboratorium. Penelitian deposit partikel yang disebabkan oleh *thermophoresis* tersebut sudah dipublikasikan oleh Waldmann 1961, Goldsmith 1966, Derjaguin et al. 1976, Talbot et al. 1980. Beberapa peneliti lain yang juga melakukan penelitian tentang *thermophoresis* dari sisi pandang yang berbeda diantaranya : Walker et al. 1979, Batchelor and Shen 1985, Stratmann and Fissan 1989, Montassier et al. 1990, Tsai and Lu 1995; He and Ahmadi 1998; Lin and Tsai 2003) tentang *thermophoresis* pada *tube/duct* aliran laminar.



Gambar 2.1. Fenomena Thermophoresis

Thermophoresis deposit partikel pada peralatan penukar kalor aliran turbulen diteliti oleh Nishio et al. 1974, Romay et al. 1998, He and Ahmadi 1998. Kemudian aplikasi *thermophoretic force* terhadap deposit partikel yang terjadi

pada *wafer surface* oleh Stratmann et al. 1988, Bae et al. 1995, dan peningkatan deposit partikel pada *impactor surface* karena pengaruh *thermophoresis* oleh Lee and Kim 2002.



Gambar 2.2. Fenomena gaya thermophoretic pada plat vertical (a) dan plat horizontal (b)

Persamaan dasar gaya *thermophoresis* yang banyak menjadi acuan peneliti-peneliti setelahnya adalah yang dirumuskan oleh Talbot (1980), yaitu :

$$F_x = \frac{-6\pi \cdot D_p \cdot \mu^2 \cdot C_s \cdot (K + C_t \cdot Kn)}{\rho(1 + 3C_m \cdot Kn)(1 + 2K + 2C_t \cdot Kn)} \frac{1}{T} \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana,

Kn = bilangan Knudsen = $2\lambda/D_p$

λ = *molecular free path* (jarak tempuh partikel)

$K = k/k_p$, dimana k adalah konduktivitas thermal fluida $k = (15/4) \mu R$

k_p adalah konduktivitas thermal partikel

$C_s = 1.17, \quad C_t = 2.18, \quad C_m = 1.14$

T = temperatur lokal fluida

μ = viskositas fluida

Persamaan Talbot didasarkan atas asumsi partikel berbentuk bola dengan fluida gas ideal.

Bilangan Knudsen menjadi salah satu fungsi dari gaya *thermophoresis*. Para peneliti juga menyetujui bahwa bilangan Knudsen ini menjadi fungsi/parameter *thermophoresis*. Meskipun pendekatan yang berbeda untuk *thermophoresis* telah dilakukan, namun nilai-nilai koefisien tersebut (*Knudsen*

Number) masih diperdebatkan dan harus ditentukan oleh data eksperimen atau studi analisis yang lebih rinci.

Penelitian lebih lanjut oleh para ilmuwan menghasilkan persamaan *thermophoresis* yang diaplikasikan berdasarkan kondisi fluida. Ada dua formula yang cukup populer yang dibuat oleh Epstein dan Derjaguin, yaitu :

$$F_E = -9\pi a \left(\frac{\mu^2}{\rho T} \right) \left(\frac{k_g}{k_g + k_s} \right) \nabla T_\infty \dots\dots\dots(2.2)$$

$$F_D = -\frac{3\pi\mu^2}{\rho T} \left[\frac{8k_g + k_s + 2c_t \left(\frac{\lambda}{a} \right) k_s}{2k_g + k_s + 2c_t \left(\frac{\lambda}{a} \right) k_s} \right] \nabla T_\infty \dots\dots\dots(2.3)$$

keterangan :

- F_E : gaya *thermophoretic* oleh Epstein
- F_D : gaya *thermophoretic* oleh Derjaguin
- a : jari-jari partikel aerosol
- k_g : konduktivitas termal gas
- k_s : konduktivitas termal partikel
- ΔT_∞ : gradien temperatur
- T : temperatur absolut
- ρ : massa jenis
- μ : viskositas dinamik
- c_t : konstanta yang bergantung pada interaksi aerosol gas dan partikel

2.2. DEFINISI AEROSOL

Aerosol merupakan partikel dari zat padat atau cair yang tersuspensi dalam gas. Pada jumlah tertentu, maka aerosol akan menjadi zat atau unsur pencemar udara, sehingga kualitas udara akan menjadi rusak akibat kontaminasi zat tersebut. Hal ini akan membahayakan kesehatan tubuh manusia dan daya dukung udara terhadap lingkungan.

Beberapa zat pencemar udara yang banyak dijumpai seperti :

2.2.1 Emisi Karbon Monoksida (CO)

Asap kendaraan merupakan sumber utama bagi karbon monoksida di berbagai perkotaan. Data mengungkapkan bahwa 60% pencemaran udara di Jakarta disebabkan karena benda bergerak atau transportasi umum yang berbahan bakar solar terutama berasal dari bus angkutan umum. Formasi CO merupakan fungsi dari rasio kebutuhan udara dan bahan bakar dalam proses pembakaran di dalam ruang bakar mesin diesel. Percampuran yang baik antara udara dan bahan bakar terutama yang terjadi pada mesin-mesin yang menggunakan Turbocharge merupakan salah satu strategi untuk meminimalkan emisi CO.

Karbon monoksida yang meningkat di berbagai perkotaan dapat mengakibatkan turunnya berat janin dan meningkatkan jumlah kematian bayi serta kerusakan otak.

2.2.2 Nitrogen Oksida (NOx)

Secara teoritis ada 3 teori yang mengemukakan terbentuknya NOx, yaitu:

1. Thermal NOx (Extended Zeldovich Mechanism)

Proses ini disebabkan gas nitrogen yang beroksidasi pada suhu tinggi pada ruang bakar ($>1800\text{K}$). Thermal NOx ini didominasi oleh emisi NO ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$).

2. Prompt NOx

Formasi NOx ini akan terbentuk cepat pada zona pembakaran.

3. Fuel NOx

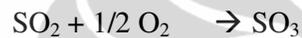
NOx formasi ini terbentuk karena kandungan N dalam bahan bakar.

Kira-kira 90% dari emisi NOx adalah disebabkan proses thermal NOx. Nitrogen oksida yang ada di udara yang dihirup oleh manusia dapat menyebabkan kerusakan paru-paru. Setelah bereaksi dengan atmosfer zat ini membentuk partikel-partikel nitrat yang amat halus yang dapat menembus bagian terdalam paru-paru. Selain itu zat oksida ini jika bereaksi dengan asap bensin yang tidak terbakar

dengan sempurna dan zat hidrokarbon lain akan membentuk ozon rendah atau smog kabut berawan coklat kemerahan yang menyelimuti sebagian besar kota di dunia.

2.2.3 SO_x (Sulfur Oxide : SO₂, SO₃)

Emisi SO_x terbentuk dari fungsi kandungan sulfur dalam bahan bakar, selain itu kandungan sulfur dalam pelumas, juga menjadi penyebab terbentuknya SO_x emisi. Struktur sulfur terbentuk pada ikatan aromatic dan alkyl. Dalam proses pembakaran sulfur dioxide dan sulfur trioxide terbentuk dari reaksi:



Kandungan SO₃ dalam SO_x sangat kecil sekali yaitu sekitar 1-5%. Gas yang berbau tajam tapi tidak berwarna ini dapat menimbulkan serangan asma, gas ini pun jika bereaksi di atmosfer akan membentuk zat asam. Badan WHO PBB menyatakan bahwa saat ini jumlah sulfur dioksida di udara telah mencapai ambang batas yang ditetapkan oleh WHO.

2.2.4 Emisi HydroCarbon (HC)

Pada mesin, emisi Hidrokarbon (HC) terbentuk dari bermacam-macam sumber. Tidak terbakarnya bahan bakar secara sempurna, tidak terbakarnya minyak pelumas silinder adalah salah satu penyebab munculnya emisi HC. Emisi HC pada bahan bakar HFO yang biasa digunakan pada mesin-mesin diesel besar akan lebih sedikit jika dibandingkan dengan mesin diesel yang berbahan bakar Diesel Oil (DO). Emisi HC ini berbentuk gas metan (CH₄). Jenis emisi ini dapat menyebabkan leukemia dan kanker.

2.2.5 Partikulat Matter (PM)

Partikel debu dalam emisi gas buang terdiri dari bermacam-macam komponen. Bukan hanya berbentuk padatan tapi juga berbentuk cairan

yang mengendap dalam partikel debu. Pada proses pembakaran debu terbentuk dari pemecahan unsur hidrokarbon dan proses oksidasi setelahnya. Dalam debu tersebut terkandung debu sendiri dan beberapa kandungan metal oksida. Dalam proses ekspansi selanjutnya di atmosfer, kandungan metal dan debu tersebut membentuk partikulat. Beberapa unsur kandungan partikulat adalah karbon, SOF (*Soluble Organic Fraction*), debu, SO₄, dan H₂O. Sebagian benda partikulat keluar dari cerobong pabrik sebagai asap hitam tebal, tetapi yang paling berbahaya adalah butiran-butiran halus sehingga dapat menembus bagian terdalam paru-paru. Diketahui juga bahwa di beberapa kota besar di dunia perubahan menjadi partikel sulfat di atmosfer banyak disebabkan karena proses oksidasi oleh molekul sulfur.

2.3. GAYA-GAYA YANG MEMPENGARUHI PERGERAKAN PARTIKEL

Sebelum membahas gaya-gaya yang mempengaruhi pergerakan partikel, akan dijelaskan dahulu tentang proses perpindahan kalor secara konveksi alamiah.

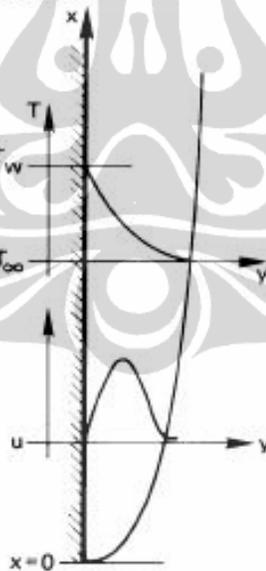
2.3.1. Konveksi Alamiah

Perpindahan Kalor Konveksi Bebas pada Plat Rata Vertikal

Konveksi alamiah (*natural convection*) atau konveksi bebas (*free convection*) terjadi karena fluida yang berubah densitasnya (kerapatan) karena proses pemanasan akan bergerak naik. Radiator panas yang digunakan untuk memanaskan ruang merupakan suatu contoh praktis piranti yang memindahkan kalor dengan konveksi bebas. Gerakan fluida dalam konveksi bebas, baik fluida tersebut berbentuk gas maupun cair, terjadi karena gaya apung (*buoyancy force*) yang dialaminya apabila densitas fluida di dekat permukaan permukaan perpindahan kalor berkurang sebagai akibat proses pemanasan. Gaya apung itu tidak akan terjadi apabila fluida itu mengalami sesuatu gaya dari luar seperti gravitasi (gaya berat), walaupun gravitasi bukan satu-satunya medan gaya luar

yang dapat menghasilkan arus konveksi-bebas. Gaya apung yang menyebabkan arus konveksi bebas disebut gaya badan (*body force*).

Apabila sebuah plat dipanaskan, terbentuklah suatu lapisan batas konveksi bebas seperti terlihat pada **Gambar 2.3**. Profil kecepatan pada lapisan batas ini tidak seperti profil kecepatan pada lapisan konveksi paksa. Pada dinding, kecepatan adalah nol, karena terdapat kondisi tanpa tergelincir (*no-slip*). Kecepatan itu bertambah terus sampai mencapai suatu nilai maksimum, kemudian menurun lagi hingga nol pada tepi lapisan batas, karena kondisi "arus bebas" ("*free-stream*") tidak ada pada sistem konveksi bebas. Perkembangan awal lapisan batas ialah laminar, tetapi pada suatu jarak tertentu dari tepi ujung depan, bergantung pada sifat-sifat fluida dan beda suhu antara dinding dengan lingkungan, terbentuklah pusaran-pusaran dan transisi ke lapisan batas turbulen terjadi. Pada jarak lebih jauh lagi, lapisan batas mungkin sudah menjadi turbulen sepenuhnya.



Gambar 2.3. Lapisan Batas di atas plat-rata vertikal [51]

Untuk menganalisa masalah perpindahan-kalor, pada awalnya harus didapatkan persamaan diferensial pada gerakan lapisan batas tersebut. Maka asumsi yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial adalah

koordinat x sepanjang plat tersebut dan koordinat y tegak lurus pada plat. Gaya yang harus diperhitungkan adalah berat (bobot) unsur fluida tersebut. Kemudian disamakan jumlah gaya luar (*external forces*) pada arah x dengan perubahan fluks momentum melalui volume kendali $dx dy$, hasilnya adalah sebagai berikut :

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} - \rho g + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \dots\dots\dots (2.4)$$

di mana suku $-\rho g$ menunjukkan gaya bobot yang dialami oleh unsur itu. Gradien atau landaian tekanan (*pressure gradient*) pada arah x terjadi karena perubahan ketinggian di atas plat tersebut, sehingga

$$- \frac{dp}{dx} = \rho_{\infty} g \dots\dots\dots(2.5)$$

Dengan kata lain, perubahan tekanan sepanjang tinggi dx sama dengan bobot persatuan luas unsur fluida. Dengan mensubsitusikan persamaan (2.5) ke persamaan (2.4) akan menghasilkan :

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = g(\rho_{\infty} - \rho) + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \dots\dots\dots (2.6)$$

beda densitas $\rho_{\infty} - \rho$ dapat dinyatakan dengan muai (ekspansi) volume (*volume coefisien of expansion*) β , yang di definisikan dengan:

$$\beta = \frac{1}{V} \left. \frac{\partial V}{\partial T} \right|_p = \frac{1}{V_{\infty}} \frac{V - V_{\infty}}{T - T_{\infty}} = \frac{\rho_{\infty} - \rho}{\rho(T - T_{\infty})}$$

sehingga

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = g \rho \beta (T - T_{\infty}) + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \dots\dots\dots (2.7)$$

Walaupun gerakan fluida disebabkan oleh perbedaan densitas, perbedaan ini biasanya kecil, dan untuk menyederhanakan penyelesaian diasumsikan aliran tak mampu mampat (*incompressible flow*), artinya densitas (ρ) = konstan. Untuk

mendapatkan penyelesaian atas persamaan gerak, digunakan metode analisis integral (sesuai dengan referensi JP Holman) dan didapatkan persamaan akhir untuk tebal lapisan batas adalah :

$$\frac{\delta}{x} = 3,93 Pr^{-1/2} (0,952 + Pr)^{1/4} Gr_x^{-1/4} \dots\dots\dots (2.8)$$

dimana bilangan Prantdl $Pr = \nu/\alpha$ digunakan bersama suatu grup tak berdimensi baru yang disebut dengan bilangan Grashof Gr_x :

$$Gr_x = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)x^3}{\nu^2} \dots\dots\dots (2.9)$$

g = percepatan gravitasi [m/s^2]

β = koefisien muai volume

ΔT = perbedaan temperatur gas antara plat (T_w) dan lingkungan (T_∞) [K]

x = panjang plat [m]

ν = viskositas kinematik gas pada suhu T_{abs} [m^2/s]

Koefisien perpindahan kalor dapat dievaluasi dari :

$$q_w = -kA \left. \frac{dT}{dy} \right|_w = hA(T_w - T_\infty)$$

Dan akan didapatkan :

$$h = \frac{2k}{\delta} \text{ atau } \frac{hx}{k} = Nu_x = 2 \frac{x}{\delta}$$

Sehingga didapatkan persamaan tak-berdimensi untuk koefisien perpindahan kalor menjadi :

$$Nu_x = 0,508 Pr^{1/2} (0,952 + Pr)^{-1/4} Gr_x^{1/4} \dots\dots\dots (2.10)$$

Bilangan Grashof dapat ditafsirkan secara fisik sebagai suatu grup tak berdimensi yang menggambarkan perbandingan antara gaya apung dengan gaya

viskos di dalam aliran konveksi bebas. Peranannya sama dengan peranan bilangan Reynolds dalam sistem aliran lapisan batas dari laminar menjadi turbulen. Untuk udara dalam konveksi bebas di atas plat rata vertikal, bilangan Grashof kritis menurut pengamatan Eckert dan Soehngen ialah kira-kira 4×10^8 . Nilai antara 10^8 sampai 10^9 biasa diamati untuk berbagai fluida dan lingkungan "tingkat turbulen" ("turbulence level") kemudian dikenal bilangan Rayleigh (R_a) yang merupakan produk perkalian antara bilangan Grashoff dan bilangan Prandtl (J P Holman Perpindahan Kalor).

$$R_a = Gr Pr \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

Bila bilangan Rayleigh kurang dari 10^6 menandakan bahwa gaya apung masuk pada aliran laminar, bila $10^6 < Ra < 10^7$ daerah transisi dari laminar ke turbulen setelah melewati nilai 10^7 maka alirannya menjadi turbulen.

Bilangan Grashof memegang peranan penting dalam konveksi bebas sedangkan bilangan Reynolds berperan dalam konveksi paksa. Dimana bilangan Reynolds merupakan perbandingan antara gaya inerti (*inertia force*) dan gaya viskos (*viscous force*). Bilangan Grashof menunjukkan perbandingan gaya apung (*buoyancy force*) dengan gaya viskos (*viscous force*). Untuk menentukan peran kedua bilangan tersebut pada proses konveksi, maka dapat ditentukan dari perbandingan nilai *Grasshoff* dan nilai *Reynolds* kuadrat fluida tersebut (Incropera and De Witt), yaitu :

- $\frac{Gr}{Re^2} \ll 1$ Konveksi alamiah diabaikan (2.12a)

- $\frac{Gr}{Re^2} \sim 1$ Konveksi alamiah dan konveksi paksa dipertimbangkan .. (2.12b)

- $\frac{Gr}{Re^2} \gg 1$ Konveksi paksa diabaikan (2.12c)

2.3.2. Gaya Gravitasi (*Gravity Force*)

Gaya gravitasi adalah gaya yang timbul akibat gaya tarik bumi/gravitasi bumi. Untuk partikel berbentuk bola, gaya gravitasinya adalah :

$$F_g = m_d g = \frac{4}{3} \pi \cdot r_d^3 \rho_d \cdot g \dots\dots\dots (2.13)$$

Keterangan :

- Fg : gaya gravitasi, [N]
- m_d : massa partikel, [kg]
- g : tetapan gravitasi, [m/s²]
- ρ_d : massa jenis partikel, [kg/m³]
- r_d : jari-jari partikel, [m]

2.3.3. Gaya Apung (*Buoyancy Force*)

Fluida dengan temperatur yang lebih tinggi akan mempunyai densitas yang lebih rendah dibandingkan dengan temperatur yang lebih rendah, sehingga fluida yang mempunyai densitas yang rendah akan naik dan digantikan dengan fluida yang mempunyai densitas yang lebih tinggi.

Gaya apung (*buoyancy force*) pada konveksi natural/bebas sangat tergantung pada bilangan Grashof seperti sudah dijelaskan pada **subbab 2.3.1** tentang konveksi alamiah. Bila perbandingan bilangan Grashof dengan bilangan Reynolds kuadrat sangat kecil sekali ($\frac{Gr}{Re^2} \ll 1$), maka konveksi alamiah dapat diabaikan dan bila terjadi pergerakan pada fluida tersebut, maka pergerakan itu disebabkan oleh pengaruh gaya luar yang lain.

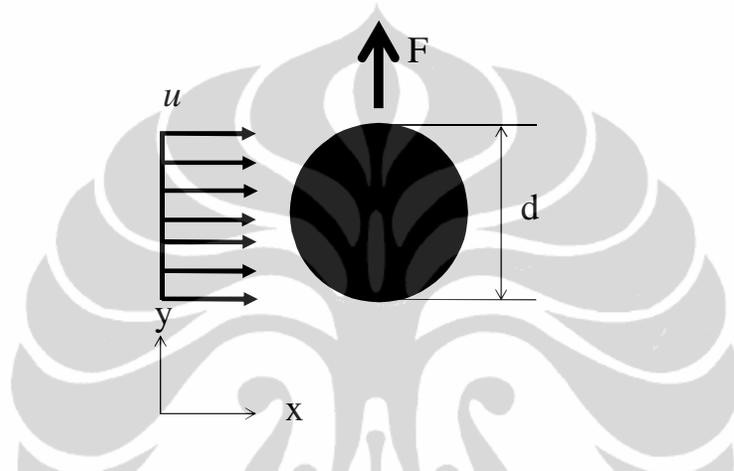
2.3.4. Gaya Angkat Saffman (*Saffman Lift Force*)

Partikel kecil pada bidang geser (*shear field*) seperti pada **Gambar 2.4** akan mengalami gaya angkat tegak lurus dari arah aliran. Gaya *shear lift* berasal dari efek inersia dari aliran *viscous* di sekitar partikel. Gaya ini pada dasarnya berbeda dengan gaya angkat aerodinamik. Persamaan untuk *inertial shear lift* pertama kali di temukan oleh Saffman (1965-1968) yaitu :

$$F_{L(Saff)} = 1.615 \rho v^{1/2} d^2 (u^f - u^p) \left[\frac{du^f}{dy} \right]^{-1/2} \text{sgn} \left(\frac{du^f}{dy} \right) \dots\dots\dots (2.14)$$

dimana

- u^f : kecepatan fluida pada pusat massa dari partikel [m/s]
- u^p : kecepatan partikel [m/s]
- d : diameter partikel [m]
- ρ : densitas fluida [kg/m³]
- ν : viskositas kinematik fluida [m²/s]



Gambar 2.4. Gaya angkat Saffman pada partikel

2.3.5. Gaya Elektrostatis (*Electrostatic Force*)

Salah satu gaya yang mempengaruhi pergerakan partikel adalah adanya medan listrik yang mengalir dari tegangan yang tinggi ke tegangan yang lebih rendah. Setiap partikel memiliki elektron sebagai bagian dari partikel tersebut, akibat adanya elektron tersebut maka ketika medan listrik mengalir dari tegangan yang tinggi ke tegangan yang rendah maka elektron tersebut akan terdorong ke tegangan yang lebih rendah, seperti yang dilihat pada **Gambar 2.5**.

Persamaan untuk pergerakan partikel akibat adanya medan listrik adalah:

$$F_E = Eq \dots\dots\dots (2.15)$$

dimana:

- F_E : *electrostatic force*
- E : *electric field*
- q : *particle charge*

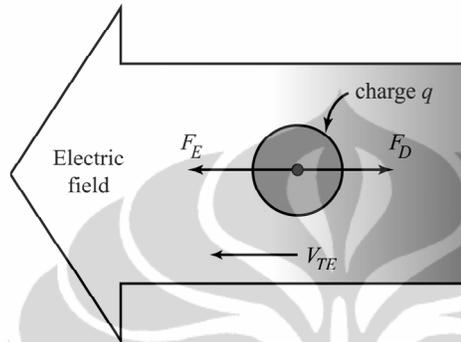
kemudian besarnya nilai q dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$q = ne \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

dimana :

n : number of charge

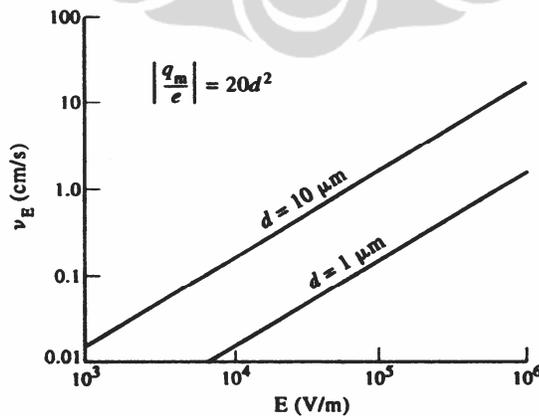
e : electron charge ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C)



Gambar 2.5. Skema electrostatic force

Dari skema pada **Gambar 2.5.** terlihat bahwa partikel bergerak searah dengan medan elektrik. Besarnya gaya elektrostatis berbanding lurus dengan banyaknya partikel dan besarnya medan elektrik yang diberikan.

Pada **Gambar 2.6** menunjukkan bahwa *electrostatic force* sangat bergantung dengan beda tegangan dan diameter partikel. Semakin besar diameter yang digunakan, maka akan semakin besar kecepatan pergerakan partikel yang di sebabkan oleh *electrostatic force*.



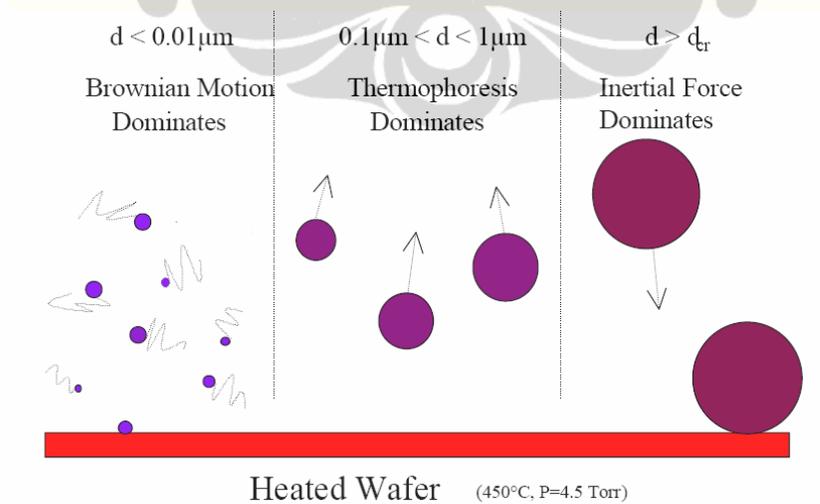
Gambar 2.6. Grafik v terhadap E

Gaya elektrostatik terjadi karena adanya perbedaan muatan antar partikel, namun gaya ini baru akan terjadi pada suatu partikel jika partikel tersebut berada pada suatu medan listrik yang memiliki beda tegangan sebesar $E = 10^4$ V, dan nilai tegangan dalamnya 220 Volt.

2.3.6. Gerak Acak Brownian (*Brownian Motion*)

Gerak ini terjadi pada partikel yang berukuran submikron. Gerakan ini terjadi karena efek momentum antar partikel. Jadi pergerakan Brownian merupakan pergerakan acak (random) dari suatu partikel solid yang tersuspensi dalam suatu fluida. Pergerakan Brownian tersebut disebabkan oleh adanya ketidakseimbangan gaya yang dihasilkan dari pergerakan partikel-partikel fluida yang berukuran jauh lebih kecil dari partikel solid dan menumbuk partikel solid secara berulang-ulang.

Dikarenakan dimensi partikel fluida yang sangat kecil, untuk dapat menghasilkan pergerakan Brownian maka dimensi partikel solid juga sangat kecil. Pergerakan Brownian berlaku untuk partikel sub-mikron dalam aliran laminar. Pada aliran turbulen, pergerakan Brownian tidak berlaku. Untuk mengetahui efektivitas dari gerak brownian, gaya *thermophoresis* dan momen inersia terhadap pergerakan partikel, berikut perbandingan pergerakannya :



Gambar 2.7 Pergerakan partikel pada umumnya

2.4. ANALISA NON DIMENSIONAL

Pada umumnya untuk menganalisa permasalahan dari suatu eksperimen dilakukan suatu penyederhanaan. Sebagai pendekatan digunakan koefisien yang telah didapat/ditentukan secara/dari eksperimen. Hal ini dilakukan agar perhitungannya dapat dibuat secara praktis.

Cara lain yang digunakan sebagai penyelesaian adalah dengan mencoba menentukan secara umum bagaimana koefisien yang ditetapkan dari eksperimen dan juga tergantung pada variabel yang mempengaruhi persamaan tersebut. Cara ini dikenal sebagai analisa dimensional yang dipergunakan jika variabel yang mempengaruhi gejala fisik diketahui, akan tetapi hubungan antara yang satu dengan yang lainnya belum diketahui. Pada dasarnya analisa dimensional adalah suatu metode yang digunakan untuk mengurangi jumlah dan kerumitan variabel fisik suatu persamaan dalam soal (percobaan).

Henry L. Langhaar (1980) dalam bukunya berjudul "*Dimensional Analysis and Theory of Models*" menyebutkan bahwa analisa dimensional adalah metode untuk menyimpulkan informasi mengenai suatu fenomena dari satu perkiraan tentang fenomena yang dapat digambarkan menjadi suatu dimensi persamaan yang tepat dari variabel-variabel yang ada.

Metode analisis dimensional yang digunakan adalah metode *Buckingham* atau lebih dikenal dengan istilah "*metode Pi*". Tahap ini dimulai dengan menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi suatu fenomena *thermophoresis* dari disain alat eksperimen seperti beda temperatur, jarak antar plat, dan *thermophysical properties* dari partikel/debu. Parameter analisis dimensional dapat dilihat pada **Tabel 2.1**.

Langkah-langkah dalam menggunakan metode *Pi-Buckingham* adalah sebagai berikut :

1. Pilih n besaran fisik (variabel fisik) yang ada/berkaitan dengan persamaan yang hendak dicari/dipecahkan, catat dimensi-dimensinya. Pilih k besaran dasar, sehingga akan didapat kelompok yang *independent* dan tak berdimensi, suku $\pi = (n - k)$.

2. Pilih k dari besaran-besaran tersebut, tak satupun yang tak berdimensi dan tak ada yang berdimensi sama. Semua dimensi dasar harus dimasukan bersama dalam besaran-besaran yang dipilih.
3. Suku π pertama dapat dinyatakan sebagai hasil kali dari besaran-besaran terpilih, masing-masing dengan sebuah pangkat yang tidak diketahui dan satu besaran lain dengan pangkat yang diketahui (biasanya ditentukan satu demi satu).
4. Menggunakan kembali besaran-besaran terpilih dari poin 2 sebagai variabel pengulang dan pilih satu dari variabel sisanya untuk menyatakan suku π selanjutnya. Mengulangi prosedur ini untuk suku π selanjutnya secara berturut-turut.
5. Untuk setiap suku π jawablah/carilah pangkat-pangkat yang tidak diketahui dengan menggunakan analisa dimensional.

Tabel 2.1. Parameter Analisa Dimensional

Besaran	Satuan	Lambang	Dimensi
Gradien temperatur	°C	ΔT	θ
Gaya	Newton	F	MLT^{-2}
Jarak antara plat panas dan dingin	Meter	L	L
Densitas	Kg/m^3	ρ	ML^{-3}
Kalor spesifik	J/mol K	C_p	$L^2T^{-2}\theta^{-1}$
Viskositas dinamik	Ns/m^2	μ	$ML^{-1}T^{-1}$
Konduktivitas termal	W/mK	k	$MLT^{-3}\theta^{-1}$
Percepatan gravitasi	m/s^2	g	LT^{-2}
Koefisien ekspansi thermal volumetric	K^{-1}	β	θ^{-1}

Terdapat 9 parameter / besaran fisik yaitu : $\Delta T, F, L, \rho, \mu, C_p, k, g, \beta$.

dan 4 besaran dasar, maka suku $\Pi = 9-4= 5$ kelompok.

$$f(\Delta T, F, L, \rho, \mu, C_p, k, g, \beta) = 0$$

$$\emptyset(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5) = 0$$

a. $\Pi_1 = \mu, L, g, \Delta T$ (Cp)

$$\begin{aligned} M^0 L^0 T^0 \theta^0 &= \mu^{a1} L^{b1} g^{c1} \Delta T^{d1} \text{ (Cp)} \\ &= (M^{a1} L^{-a1} T^{-a1}) (L^{b1}) (L^{c1} T^{-2c1}) (\theta^{d1}) (L^2 T^{-2} \theta^{-1}) \\ &= M^{a1} L^{-a1+b1+c1+2} T^{-a1-2c1-2} \theta^{d1-1} \end{aligned}$$

$$a1 = 0$$

$$-a1+b1+c1+2 = 0$$

$$-a1-2c1-2 = 0$$

$$d1-1 = 0$$

$$a1 = 0$$

$$b1 = -1$$

$$c1 = -1$$

$$d1 = 1$$

$$\Pi_1 = \mu^0 L^{-1} g^{-1} \Delta T^1 \text{ Cp} = \frac{Cp \cdot \Delta T}{L \cdot g}$$

b. $\Pi_2 = \mu, L, g, \Delta T$ (k)

$$\begin{aligned} M^0 L^0 T^0 \theta^0 &= \mu^{a2} L^{b2} g^{c2} \Delta T^{d2} \text{ (k)} \\ &= (M^{a2} L^{-a2} T^{-a2}) (L^{b2}) (L^{c2} T^{-2c2}) (\theta^{d2}) (MLT^{-3}\theta^{-1}) \\ &= M^{a2+1} L^{-a2+b2+c2+1} T^{-a2-2c2-3} \theta^{d2-1} \end{aligned}$$

$$a2+1 = 0$$

$$-a2+b2+c2+1 = 0$$

$$-a2-2c2-3 = 0$$

$$d2-1 = 0$$

$$a2 = -1$$

$$b2 = -1$$

$$c2 = -1$$

$$d2 = 1$$

$$\Pi_2 = \mu^{-1} L^{-1} g^{-1} \Delta T^1 k = \frac{k \cdot \Delta T}{\mu \cdot L \cdot g}$$

c. $\Pi_3 = \mu, L, g, \Delta T (\rho)$

$$\begin{aligned} M^0 L^0 T^0 \theta^0 &= \mu^{a3} L^{b3} g^{c3} \Delta T^{d3} (\rho) \\ &= (M^{a3} L^{-a3} T^{-a3}) (L^{b3}) (L^{c3} T^{-2c3}) (\theta^{d3}) (ML^{-3}) \\ &= M^{a3+1} L^{-a3+b3+c3-3} T^{-a3-2c3} \theta^{d3} \end{aligned}$$

$$a3+1 = 0$$

$$-a3+b3+c3-3 = 0$$

$$-a3-2c3 = 0$$

$$d3 = 0$$

$$a3 = -1$$

$$b3 = 3/2$$

$$c2 = 1/2$$

$$d2 = 0$$

$$\Pi_3 = \mu^{-1} L^{3/2} g^{1/2} \Delta T^0 \rho = \frac{\rho \cdot \sqrt{L^3} \sqrt{g}}{\mu} = \frac{\rho \sqrt{L^3 g}}{\mu}$$

d. $\Pi_4 = \mu, L, g, \Delta T (F)$

$$\begin{aligned} M^0 L^0 T^0 \theta^0 &= \mu^{a4} L^{b4} g^{c4} \Delta T^{d4} (F) \\ &= (M^{a4} L^{-a4} T^{-a4}) (L^{b4}) (L^{c4} T^{-2c4}) (\theta^{d4}) (MLT^{-2}) \\ &= M^{a4+1} L^{-a4+b4+c4+1} T^{-a4-2c4-2} \theta^{d4} \end{aligned}$$

$$a4+1 = 0$$

$$-a4+b4+c4+1 = 0$$

$$-a4-2c4-2 = 0$$

$$d4 = 0$$

$$a4 = -1$$

$$b4 = -3/2$$

$$c4 = -1/2$$

$$d4 = 0$$

$$\Pi_4 = \mu^{-1} L^{-3/2} g^{-1/2} \Delta T^0 F = \frac{F}{\mu \sqrt{L^3} \sqrt{g}} = \frac{F}{\mu \sqrt{L^3 g}}$$

e. $\Pi_5 = \mu, L, g, \Delta T (\beta)$

$$\begin{aligned} M^0 L^0 T^0 \theta^0 &= \mu^{a5} L^{b5} g^{c5} \Delta T^{d5} (\beta) \\ &= (M^{a5} L^{-a5} T^{-a5}) (L^{b5}) (L^{c5} T^{-2c5}) (\theta^{d5}) (\theta^{-1}) \\ &= M^{a5} L^{-a5+b5+c5} T^{-a5-2c5} \theta^{d5-1} \end{aligned}$$

$$a5 = 0$$

$$-a5+b5+c5 = 0$$

$$-a5-2c5 = 0$$

$$d5 - 1 = 0$$

$$a5 = 0$$

$$b5 = 0$$

$$c5 = 0$$

$$d5 = 1$$

$$\Pi_5 = \mu^0 L^0 g^0 \Delta T^1 \beta = \Delta T \cdot \beta$$

$$\emptyset (\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5) = 0$$

$$\emptyset \left(\frac{Cp \cdot \Delta T}{L \cdot g}, \frac{k \cdot \Delta T}{\mu \cdot L \cdot g}, \frac{\rho \sqrt{L^3 g}}{\mu}, \frac{F}{\mu \sqrt{L^3 g}}, \Delta T \cdot \beta \right) = 0$$

$$\frac{F}{\mu \sqrt{L^3 g}} = f \left(\frac{Cp \cdot \Delta T}{L \cdot g}, \frac{k \cdot \Delta T}{\mu \cdot L \cdot g}, \frac{\rho \sqrt{L^3 g}}{\mu}, \Delta T \cdot \beta \right)$$

$$F = \mu \sqrt{L^3 g} f \left(\frac{Cp \cdot \Delta T}{L \cdot g}, \frac{k \cdot \Delta T}{\mu \cdot L \cdot g}, \frac{\rho \sqrt{L^3 g}}{\mu}, \Delta T \cdot \beta \right)$$

*) Untuk $\frac{F}{\mu \sqrt{L^3 g}} = f(\Delta T \cdot \beta)$

$$F = \mu \sqrt{L^3 g} \Delta T \cdot \beta$$

$$(\sqrt{L^3 g} \rho) F = \mu \sqrt{L^3 g} \Delta T \cdot \beta \quad \times \quad (\sqrt{L^3 g} \rho)$$

$$(\sqrt{L^3 g} \rho) F = \mu L^3 (\rho \beta \Delta T g) \quad (\rho \beta \Delta T g) = \text{buoyancy force}$$

$$(\rho/\mu^3) (\sqrt{L^3 g} \rho) F = \mu L^3 \rho \beta \Delta T g \quad \times (\rho/\mu^3)$$

$$\frac{\sqrt{L^3 g} \cdot \rho^2}{\mu^3} F = \frac{\rho^2 g \beta \Delta T L^3}{\mu^2} = Gr \quad \mathbf{Gr = \text{bilangan Grashof}}$$

$$F = Gr \frac{\mu^3}{\sqrt{L^3 g} \cdot \rho^2}$$

*) Untuk $\frac{F}{\mu \sqrt{L^3 g}} = f\left(\frac{\rho \sqrt{L^3 g}}{\mu}\right)$

$$F = \mu \sqrt{L^3 g} \frac{\rho \sqrt{L^3 g}}{\mu}$$

$$F = \rho L^3 g$$

*) Untuk $\frac{F}{\mu \sqrt{L^3 g}} = f\left(\frac{k \cdot \Delta T}{\mu \cdot L \cdot g}\right)$

$$\frac{\mu \sqrt{L^3 g}}{F} = \frac{\mu L g}{k \Delta T}$$

$$(Cp) \frac{\mu \sqrt{L^3 g}}{F} = \frac{\mu L g}{k \Delta T} \quad \times Cp$$

$$Cp \frac{\mu \sqrt{L^3 g}}{F} = \frac{\mu Cp L g}{k \Delta T}$$

$$Cp \frac{\mu \sqrt{L^3 g}}{F} = Pr \frac{Lg}{\Delta T} \quad \mathbf{Pr = \text{bilangan Prandtl}}$$

$$F = \frac{1}{Pr} \frac{Cp \mu \sqrt{L^3 g} \cdot \Delta T}{Lg}$$

*) Untuk $\frac{F}{\mu \sqrt{L^3 g}} = f\left(\frac{Cp \cdot \Delta T}{L \cdot g}\right)$

$$F = \mu \sqrt{L^3 g} \frac{Cp \cdot \Delta T}{L \cdot g}$$

$$(1/k) F = \mu \sqrt{L^3 g} \frac{Cp \cdot \Delta T}{L \cdot g} \quad \times 1/k$$

$$\frac{F}{k} = \frac{\mu Cp}{k} \frac{\Delta T \sqrt{L^3 g}}{Lg}$$

$$F = Pr \frac{\Delta T \sqrt{L^3 g}}{Lg} k$$

Sehingga formula *thermophoretic force* yang terbentuk adalah :

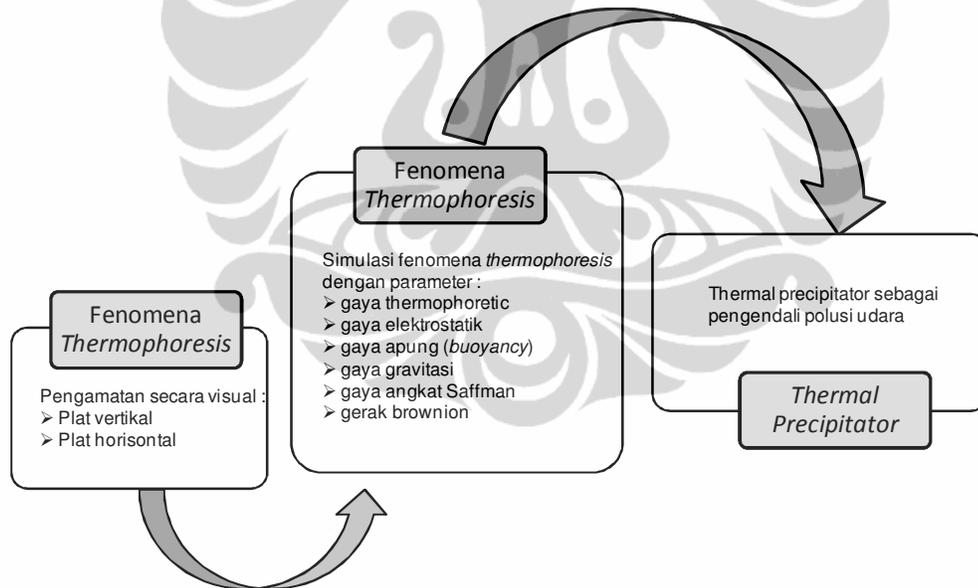
$$F = \mu \sqrt{L^3 g} f \left(\frac{Cp \cdot \Delta T}{L \cdot g}, \frac{k \cdot \Delta T}{\mu \cdot L \cdot g}, \frac{\rho \sqrt{L^3 g}}{\mu}, \Delta T \cdot \beta \right)$$

$$F = f \left(Pr \frac{\Delta T \sqrt{L^3 g}}{Lg} k, \frac{1}{Pr} \frac{Cp \mu \sqrt{L^3 g} \cdot \Delta T}{Lg}, \rho L^3 g, Gr \frac{\mu^3}{\sqrt{L^3 g} \cdot \rho^2} \right)$$

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1. TAHAPAN PENELITIAN

Seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 3.1.** skema tahapan penelitian tentang fenomena *thermophoresis*, penelitian dilakukan melalui beberapa tahap, yaitu : dilakukan pengamatan secara visual pergerakan partikel baik untuk plat vertikal maupun plat horizontal. Tahapan berikutnya penelitian dilakukan dengan berbantuan software CFD, pada simulasi ini dimasukkan semua parameter gaya yang mempengaruhi pergerakan partikel seperti gaya gravitasi (*gravitation force*), gaya apung (*buoyancy force*), gaya elektrostatik (*electrostatic force*), gaya angkat Saffman (*Saffman lift force*), dan gerak Brownian (*Borwnian motion*). Tahapan akhir dibuat alat *prototype* pengendali pencemaran udara yang berbasis *thermophoretic force* atau yang disebut dengan istilah *thermal precipitator*.

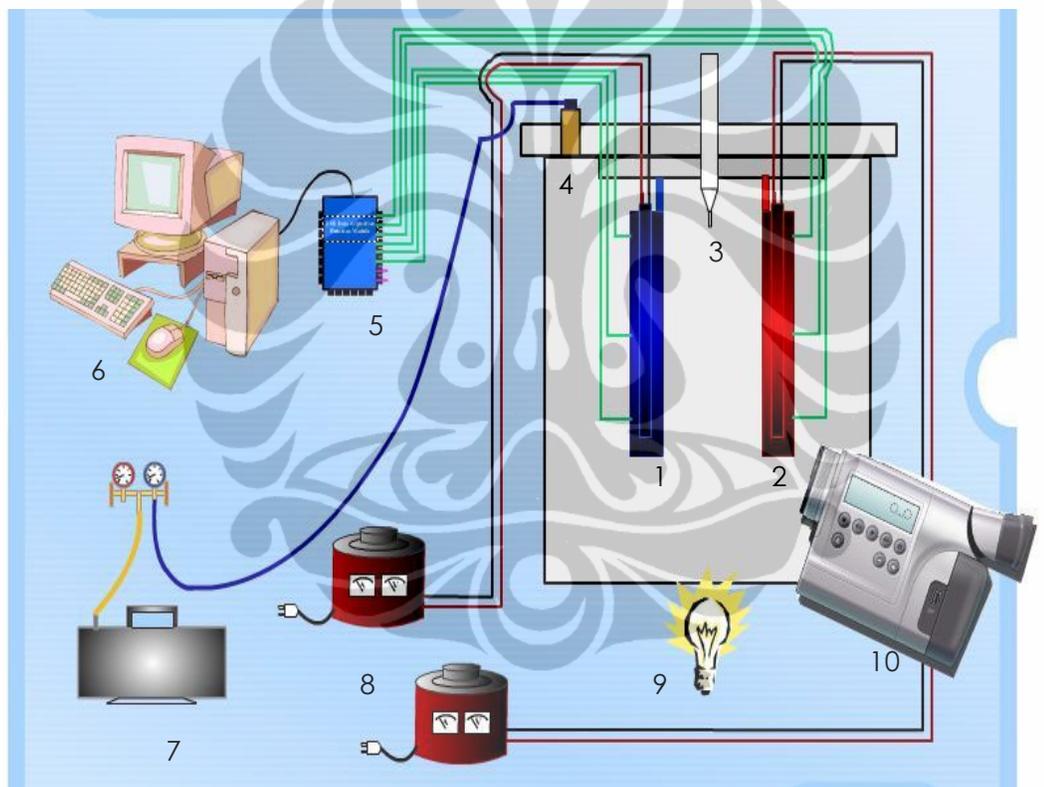


Gambar 3.1. Skema Tahapan Penelitian *Thermophoresis*

3.2. PENGUJIAN FENOMENA THERMOPHORESIS DENGAN MENGGUNAKAN PLAT VERTIKAL DAN HORIZONTAL SECARA VISUAL

3.2.1. Plat Vertikal

Pengujian fenomena *thermophoresis* diawali dengan menggunakan plat vertikal dan plat horizontal. Secara garis besar dilakukan penelitian bagaimana pergerakan partikel yang dijatuhkan di antara dua buah permukaan yang memiliki temperatur yang berbeda. Photo dan skema alat uji dapat dilihat pada **Gambar 3.2.** dan **Gambar 3.3.**



1 – plate with heater (A)
2 – plate with heater (B)
3 – fly ash feeder
4 – vacuum pump nipple
5 – DAQ

6 – computer
7 – vacuum pump
8 – voltage regulator
9 – lighting source
10 – camcorder

Gambar 3.2. Skema Alat Uji *Thermophoresis* Fenomena



Gambar 3.3. Photo Alat Uji Thermophoresis

Peralatan eksperimen terdiri dari sebuah bejana vakum berbentuk kotak dari bahan *acrylic*, *heater*, pompa vakum, video kamera *digital*, serta alat-alat ukur yang terdiri dari termokopel, *pressure gage*, voltage regulator, dan data acquisition. Di dalam bejana vakum ditempatkan dua buah plat datar dari bahan *stainless steel*, pada kedua plat dipasang *heater*. Temperatur dua buah plat tersebut diatur untuk mendapatkan *gradient* temperatur dengan menggunakan *voltage regulator*. Diantara dua plat tersebut diletakkan *particle feeder* berdiameter 0,3 mm untuk memasukan partikel *fly ash*.

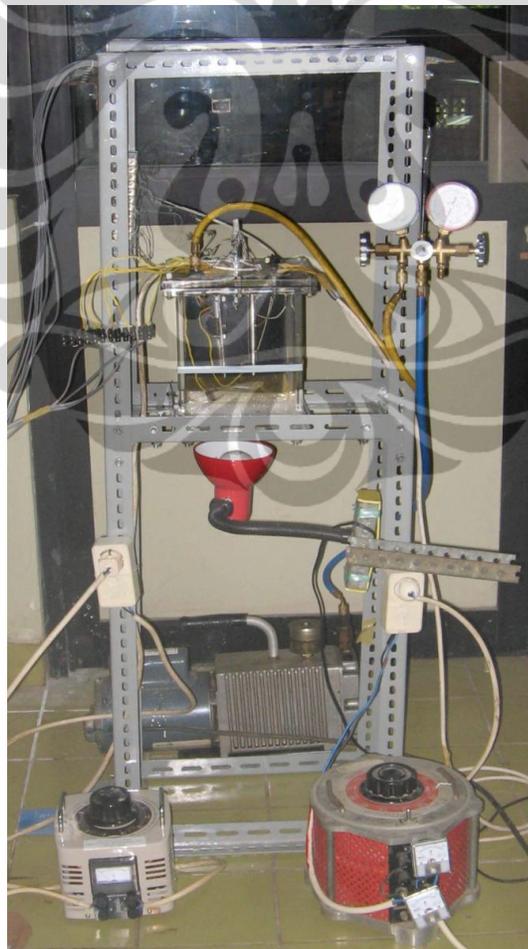
Bejana Vakuum

Bejana vakum berfungsi sebagai tempat pengamatan dari objek penelitian, dibuat dari bahan *acrylic*, berbentuk seperti kubus dengan ukuran panjang 22 cm, lebar 22 cm dan tinggi 23 cm. Gambar detail bejana tersebut dan posisi terpasang pada alat uji dapat dilihat pada **Gambar 3.4** dan **3.5**.

Bejana ini dikondisikan vakum agar dapat dihindari pengaruh angin/udara lingkungan dan partikel *fly ash* dapat jatuh secara alami. Bahan *acrylic* digunakan agar proses penelitian/pengamatan secara visual dapat dilakukan dengan menggunakan video kamera.



Gambar 3.4 Bejana vakum tanpa baut dan karet packing



Gambar 3.5 Bejana vakum pada kondisi terpasang pada alat uji

Plat Stainless Steel

Plat *stainless steel* berfungsi sebagai media permukaan perpindahan panas. Bisa juga digunakan jenis logam lain yang memiliki daya hantar panas yang baik, namun kekasaran permukaan juga perlu dipertimbangkan, sehingga dipilihlah plat *stainless steel*. Plat ini berukuran panjang 10 cm, lebar 8 cm, dan tebal plat 3 mm. Ada dua buah plat yang digunakan yang nantinya disebutkan sebagai *hot plate* dan *cold plate*. Kedua plat ini dihubungkan dengan elemen pemanas. Posisi kedua plat tepat di dalam bejana vakum seperti yang terlihat pada **Gambar 3.6**.

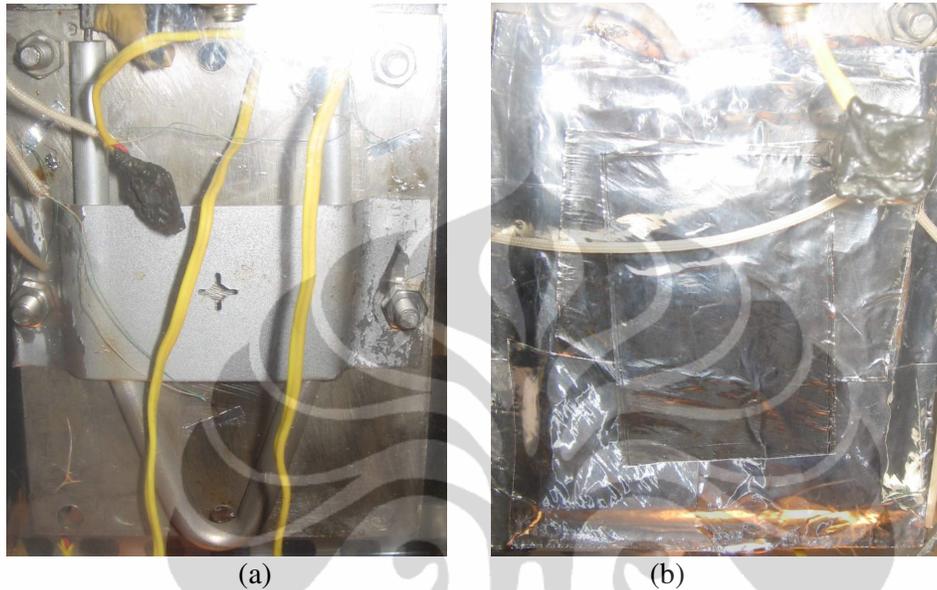


Gambar 3.6 Plat *stainless steel* di dalam bejana vakum

Elemen Pemanas (*Heater*)

Elemen pemanas digunakan untuk memanaskan plat *stainless steel*, sehingga akan didapatkan perbedaan temperatur antara kedua buah plat. Jenis elemen pemanas yang digunakan ada 2 buah yaitu jenis plat datar (300 Watt) berukuran panjang 10 cm dan lebar 8 cm dan jenis U (220 Watt) seperti dapat dilihat pada **Gambar 3.7**. Dimensi elemen pemanas ini disesuaikan dengan dimensi plat *stainless steel*. Penggunaan elemen pemanas dari jenis berbeda

dimaksudkan untuk mendapatkan karakteristik pemanasan yang berbeda pada kedua plat *stainless steel*, agar perbedaan temperatur pada kedua permukaan *stainless steel* sebagai permukaan perpindahan panas akan didapat.



**Gambar 3.7. Elemen pemanas
(a) tipe U (b) tipe plat datar**

Termokopel dan Kalibrasi

Termokopel yang digunakan dalam penelitian ini adalah termokopel tipe K, dengan material pembentuknya adalah *kromel* dan *alumel*. Ukuran termokopel yaitu 0,2 mm. Termokopel ini dipasang pada permukaan kedua plat *stainless steel*, 3 termokopel pada permukaan plat 1 (*hot plate*) dan 3 termokopel pada permukaan plat 2 (*cold plate*). Karena output dari termokopel berupa tegangan (mV), untuk pembacaannya ke dalam satuan temperatur digunakan sebuah data akusisi DT 9806.

Termokopel mentransformasi besaran temperatur yang dideteksi menjadi tegangan listrik. *Data measure foundry* mengukur besar tegangan listrik tersebut dan menampilkan hasil pengukurannya. Untuk menampilkan besar temperatur yang dideteksi termokopel, maka termokopel dikalibrasi dengan menggunakan termometer digital (*Flux meter*) sebagai referensi temperatur yang diukur.

Kalibrasi termokopel dengan menggunakan medium, yaitu medium *thermostatic bath*. Kalibrasi dengan menggunakan alat ini dilakukan untuk range suhu dari kisaran 10°C - 60° C.

Peralatan yang digunakan :

1. *Flux Meter*
2. *Thermostatic Bath*
3. *Digital Thermometer*

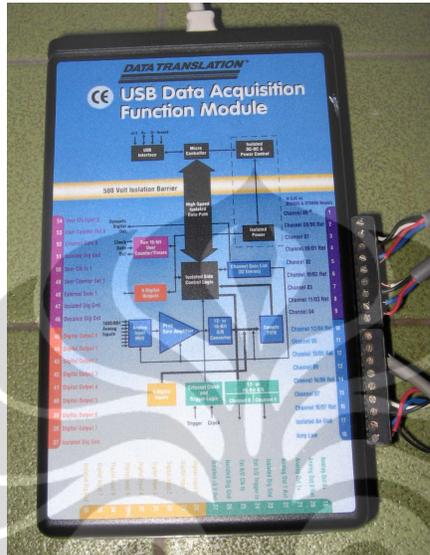
Langkah-langkah yang dilakukan untuk mengkalibrasi adalah sebagai berikut :

- a. Mengisi air *thermostatic bath* kemudian mendinginkannya sampai suhu 10 °C.
- b. Sensor termokopel yang ingin dikalibrasi disatukan bersama dengan sensor flux meter (Flux dijadikan standar ukur yang benar).
- c. Mencatat data yang ada di *flux meter*. Pengambilan data dilakukan setiap *flux meter* hingga stabil pada temperatur yang diinginkan, data diambil selama 60 detik sampai air mencapai temperatur yang stabil.
- d. Memanaskan air dalam *thermostatic bath* hingga mencapai suhu 70 ° C.
- e. Langkah yang sama dilakukan pencatatan data yang ada pada *flux meter*.
- f. Pencatatan data juga dilakukan pada termokopel.
- g. Dari data tersebut kemudian dibuat grafik temperatur antara data termokopel dengan data *flux meter*.
- h. Kemudian dibuat persamaan linearnya (persamaan garis lurus) untuk masing-masing termokopel. Persamaan linear ini dianggap sebagai faktor koreksi dari termokopel tersebut. Persamaan tersebut dimasukkan ke dalam program *data measure foundry* sebagai persamaan konversi dari nilai tegangan listrik menjadi tampilan besaran temperatur.

Data Akuisisi

Data akuisisi yang digunakan untuk pembacaan perbedaan tegangan pada termokopel tipe K adalah DT 9806 seperti terlihat pada **Gambar 3.8**. DAQ ini merupakan data akuisisi yang dapat menerima input baik analog maupun digital serta juga dapat menghasilkan *output* analog maupun digital. Dalam

penggunaannya DAQ dihubungkan dengan komputer melalui USB *port* sehingga tidak membutuhkan *power supply* dari luar dan *output*-nya berupa tampilan digital dapat langsung dilihat pada layar komputer.



Gambar 3.8 Data Akuisisi DT 9806

Instalasi alat ini menggunakan analog *input*, dimana analog input DT9806 dapat menerima *signal* berupa *single ended input*, *pseudo differential input* dan *differential input*.

- *Single ended*

Jika ingin mengukur *signal* yang cukup besar dimana pengaruh *noise* tidak signifikan dan semua *signal* input memiliki *common ground* yang sama maka digunakan *single ended* dengan demikian semua *channel* (16 *channel*) analog *input* dapat digunakan.

- *Pseudo Differential*

Konfigurasi ini digunakan apabila terdapat *noise* dan konfigurasi diferensial tidak dapat digunakan.

- *Differential*

Digunakan untuk mengukur termometer tahanan listrik dan aplikasi *signal* rendah lainnya (kurang dari 1V) ketika menggunakan konfigurasi ini *noise*

menjadi bagian dari *signal* dan cukup berpengaruh, dengan konfigurasi ini hanya 8 *channel* yang dapat digunakan.

Untuk mendapatkan tampilan temperatur dari termokopel tipe K maka perlu dilakukan kalibrasi dengan tujuan mendapatkan konversi dari tampilan tegangan menjadi temperatur (dalam derajat Celcius).

Voltage Regulator

Alat ini digunakan untuk mengatur besarnya tegangan listrik yang akan *supply* ke elemen pemanas. Pengaturan tegangan listrik dimaksudkan agar beda temperatur yang diinginkan antara plat 1 (*hot plate*) dengan plat 2 (*cold plate*) dapat tercapai. Setiap elemen pemanas dihubungkan ke *voltage regulator* (**Gambar 3.9.**) dan besarnya tegangan listrik (volt) dapat diatur.

Spesifikasi *voltage regulator* yang digunakan adalah :

Voltage regulator ke 1 : Merk Matsunaga, Range voltage Input 220 Volt / 50-60 Hz, dan output 0-240 volt

Voltage regulator ke 2 : TDGC2-1 kVA, Capacity 1000 VA, Max 4 Amp, Input 220 Volt / 50-60 Hz, dan output 0-250 volt



(a)



(b)

Gambar 3.9 *Voltage regulator*

(a) *Voltage regulator 1*, **(b)** *Voltage regulator 2*

Video Kamera

Setiap pergerakan partikel *fly ash* di dalam bejana direkam oleh video kamera seperti yang terlihat pada **Gambar 3.10.**, video kamera yang digunakan adalah SONY, nomor model DCR-TRV300, 300 X *digital zoom*. Kamera ini langsung dihubungkan dengan komputer melalui *USB port*, sehingga hasil rekaman dapat langsung dilihat dan disimpan di dalam komputer.

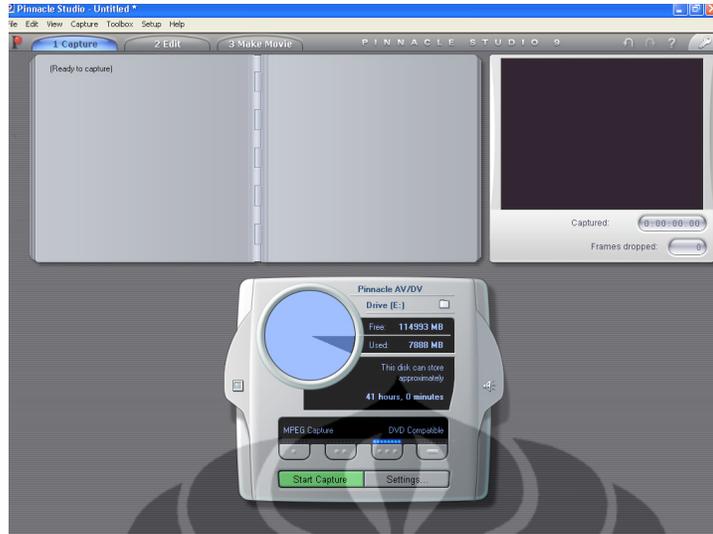


Gambar 3.10 Video kamera

Software yang digunakan untuk melihat dan menyimpan hasil rekaman kamera di dalam komputer adalah PINNACLE STUDIO PLUS Versi 9, dapat dilihat pada **Gambar 3.11.** Terdapat tiga hal yang harus dilakukan dalam upaya menggunakan *software* ini yaitu :

1. Instal terlebih dahulu *Pinnacle hardware* di dalam CPU.
2. Instal *Pinnacle software*, program dalam bentuk cd disimpan menjadi file tersendiri di dalam komputer.
3. Instalasi video kamera pada USB port komputer.

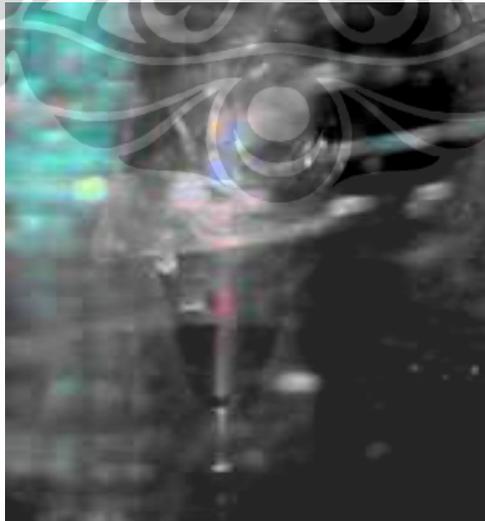
Jika semua sudah siap, maka proses merekam (*capture*) dapat dilakukan. *Software* ini nantinya digunakan untuk mengolah data pergerakan partikel (file video) menjadi *frame-frame* (format gambar) untuk setiap detik.



Gambar 3.11. Tampilan Menu Capture pada Pinnacle Studio Plus V6

Particle Feeder

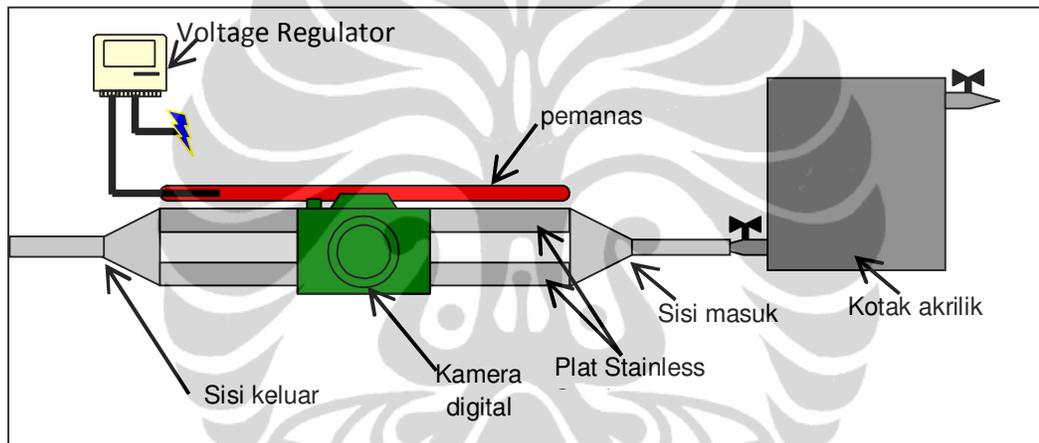
Feeder digunakan untuk memasukan partikel *fly ash* ke dalam bejana vakum. Diameter lubang feeder adalah 0,3 mm. Feeder ini memanfaatkan pensil mekanik yang berdiameter 0,3 mm seperti terlihat pada **Gambar 3.12**. Posisinya tepat di tengah-tengah plat 1 dan plat 2. Partikel *fly ash* masuk (jatuh) ke dalam bejana vakum karena adanya tekanan yang diberikan pada ujung *feeder* tersebut.



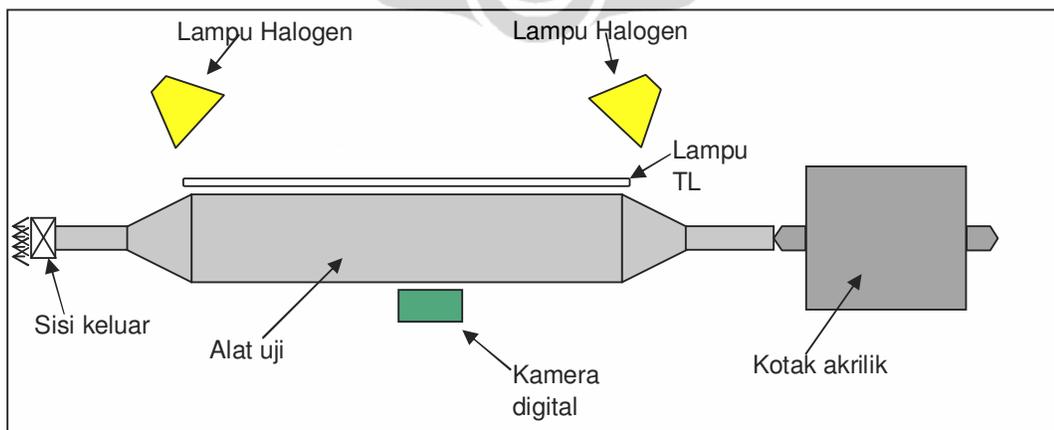
Gambar 3.12. Partikel Feeder

3.2.2. Plat Horizontal

Penelitian fenomena *thermophoresis* pada plat horizontal prinsipnya sama dengan plat vertikal. Pengamatan juga dilakukan secara visualisasi dengan menggunakan kamera digital. Perbedaan hanya pada partikel yang digunakan dan jarak antar plat panas dan plat dingin. Partikel yang digunakan pada plat horizontal adalah *aerosol smoke* yang berasal dari *tobacco smoke*. Spesifikasi aerosol smoke dapat dilihat pada **Tabel 3.1**. Jarak antar plat panas dan dingin dibuat lebih pendek yaitu 5 mm. Penentuan jarak ini sudah memperhitungkan tebal lapisan batas temperatur (*thermal boundary layer*). Skema penelitian plat horizontal dapat dilihat pada **Gambar 3.13**. dan **3.14**.



Gambar 3.13. Skema pengujian *thermophoresis* plat horizontal (tampak samping)



Gambar 3.14. Skema pengujian *thermophoresis* plat horizontal (tampak atas)

Seperti yang terlihat pada **Gambar 3.13. dan 3.14.**, peralatan eksperimen terdiri atas :

Acrylic Box

- *Dimension* = 150 x 150 x 150 mm
- *Thickness* = 10 mm
- *Material specification* = acrylic

Voltage Regulator

- *Merk* = OKI
- *Model* = TDGC-2000
- *Input* = 220VAC 50/60 Hz
- *Output* = 0~250 V
- *Capacity* = 2000VA

Temperature Controller

- *Merk* = NUX HANYOUNG, Model = KX4-KMC4
- *Size* = 48 x 48 x 112.5 mm
- *Weight* = 166 g
- *Input* = Thermocouple type K, range -50~1300°C
- *Output* = Relay
- *Power* = 100-240 VAC 50/60Hz

Heater

- *Type* = Plate Heater
- *Size* = 60 x 60 x 15 mm
- *Input* = 24 VAC 2000A
- *Temperature* = max $\pm 300^{\circ}\text{C}$

Fan

- *Merk* = TENSION
- *Size* = 50 x 10 x 5 mm
- *Input* = 12 VDC 0.18A

Test Section

- *Overall Dimension* = 500 mm x 150 mm x 100 mm
- *Material* = Stainless Steel Plate 1.2mm thickness
- *Gap between plate* = 5 mm

Hot Wire Anemometer

- *Dimension = 180 x 72 x 32 mm*
- *Probe Diameter 12mm round.*
- *Measurement Range 0.1 ~ 20 m/s, Accuracy ±5%*

Multi Tester

- *Merk = DT830B*
- *Range DCV 200mV~1000V*
- *Accuracy ±1%*

Digital Camera

- *Merk : Sony CyberShot DSC-T100, 8.1 MegaPixels*
- *Programme Setting*
 - *ISO Speed 400*
 - *Multi Shot Mode*
 - *Effect Tungsten Mode*
 - *Flash off*
 - *Spot Centre*
 - *Picture Size 1600 x 1200*
 - *Macro mode + Manual Focus*

Non-contact Thermometer

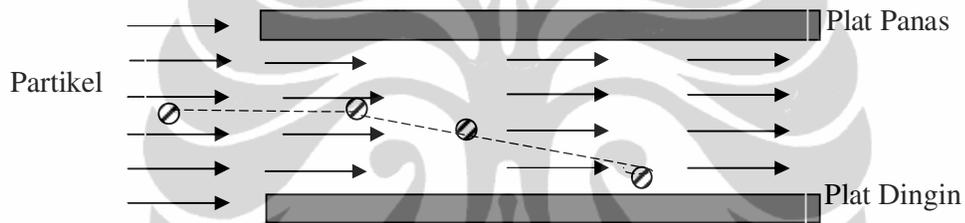
- *Merk = Raytek MiniTemp*
- *Model = MT4*
- *Measurement Method = Infrared*
- *Temp. Range = -18~275°C*

Tabel 3.1. Spesifikasi Aerosol Smoke

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Jenis Aerosol	<i>Smoke</i>	
2	Nama Aerosol	<i>Tobacco Smoke</i>	
3	Diameter partikel	0,01 ~ 1	µm
4	<i>Density</i>	1,1	g/cm ³
5	<i>Molecular mass</i>	162,23	g/mol
6	<i>Boiling point</i>	247	°C

3.3. SIMULASI FENOMENA THERMOPHORESIS

Studi simulasi fenomena *thermophoresis* ini dilakukan untuk mempermudah menganalisa faktor-faktor lain yang menyebabkan terjadinya pergerakan partikel. Sebagaimana telah disebutkan di bab pendahuluan bahwa faktor-faktor yang mempengaruhi pergerakan partikel selain *thermophoretic force* adalah *buoyancy force*, *gravitational force*, *saffman lift force*, *electrostatic force*, dan *brownian motion*. Skema simulasi *thermophoresis* dapat dilihat pada **Gambar 3.15.**, yaitu menggunakan dua buah plat horisontal. Bentuk model untuk simulasi *thermophoretic force* ini pada awalnya digambar dengan menggunakan *software* Gambit 1.2 yang kemudian akan di-*export* ke *software* untuk dianalisa dalam simulasi ini yaitu Fluent 5.3.



Gambar 3.15. Skema simulasi *thermophoresis*

Sebelum melakukan simulasi, didefinisikan terlebih dahulu kondisi aliran. Asumsi dasar yang dipakai adalah bahwa fluida mengalir di dalam suatu ruang yang di dalamnya terdapat gradien temperatur dengan kecepatan rendah.

Sifat aliran dalam simulasi adalah sebagai berikut :

1. *Steady* (tunak), yaitu tidak ada perubahan kecepatan pada saat perubahan waktu ($\frac{\delta u}{\delta t} = 0$).
2. Aliran laminar, partikel-partikel fluida bergerak dalam kondisi seragam.
3. Aliran inkompresibel, volume fluida sama di sembarang titik. Hal tersebut berarti tidak terjadi perubahan massa jenis fluida.
4. Fasa aliran adalah fasa tunggal (*single phase*), pada aliran fluida tidak terjadi perubahan fasa baik dari liquid ke gas ataupun gas ke liquid.
5. Aliran fluida homogen, fluida hanya terdiri dari satu jenis yaitu udara.

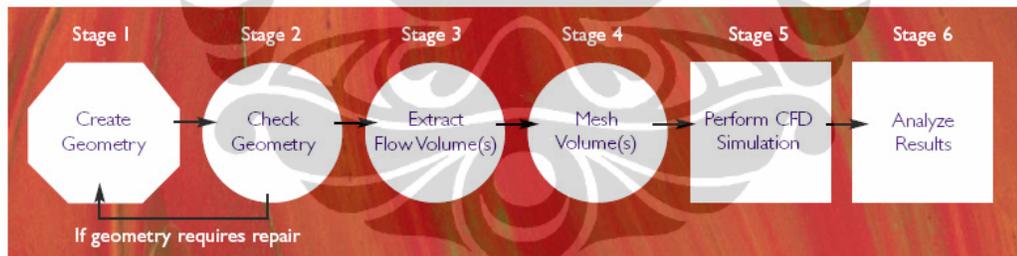
Setelah jenis aliran yang akan selesai didefinisikan, maka selanjutnya adalah menentukan sifat fisik dari fluida udara. Pada Tabel 3.2 dijelaskan mengenai sifat fisik udara sebagai fluida. Sifat fisik udara yang dimaksud adalah udara pada suhu 27°C (300 K).

Tabel 3.2. Sifat Fisik Udara untuk simulasi

No	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
1	Massa jenis	ρ	1.183	Kg/m ³
2	Suhu udara	T	300	K
3	Viskositas	μ	1.853e-05	N.s/m ²
4	Konduktivitas Termal	k	0.02614	W/m.K
5	Kalor spesifik	cp	1003	J/kg.K

Sumber : *Essential Eng Information & Data, Mc Graw-Hill, 1991*

Untuk dapat menjalankan simulasi dengan baik, pembuat software Fluent telah menetapkan prosedur sebelum simulasi. Terdapat 6 tahap yang harus diikuti untuk mendapatkan hasil simulasi yang optimal. Keenam tahap tersebut digambarkan pada Gambar 3.16.



Gambar 3.16 Prosedur simulasi Fluent

Pada tahap kelima dari prosedur simulasi dapat mulai dilakukan simulasi CFD. Namun untuk dapat memulai simulasi CFD tersebut, Fluent memerlukan beberapa data masukan yang menjelaskan kondisi dinamika fluida yang akan dihitung. Untuk menentukan data masukan yang akan di-input ke dalam software Fluent, terdapat beberapa hal yang harus dipertimbangkan sebelumnya karena akan berhubungan dengan hasil akhir dari simulasi.

Sebelum dapat melakukan simulasi, ada beberapa hal yang harus didefinisikan terlebih dahulu, yaitu :

1. Menentukan tujuan dari pemodelan.

Pemodelan yang tepat dibutuhkan untuk mendekati kondisi model yang sebenarnya sehingga analisa dari hasil simulasi tidak akan salah.

2. Pemilihan model komputasi.

Pemilihan model komputasi bertujuan untuk menentukan lapisan batas (*boundary layer*) yang digunakan, permulaan dan akhir dari perhitungan fluida dan juga tipe aliran apakah 2D atau 3D.

3. Pemilihan model fisik.

Pemilihan model fisik bertujuan untuk mengetahui kondisi aliran yang terjadi. Kondisi aliran tersebut meliputi aliran tunak atau tidak tunak, kompresibel atau tidak dan dipengaruhi oleh perpindahan panas atau tidak.

4. Penentuan model solusi.

Penentuan model solusi bertujuan untuk memastikan bahwa kondisi aliran yang telah didefinisikan sebelumnya dapat disolusikan dan sesuai dengan kondisi memori yang tersedia. Oleh karenanya tingkat kerumitan aliran harus disesuaikan pada saat pemilihan model solusi ini.

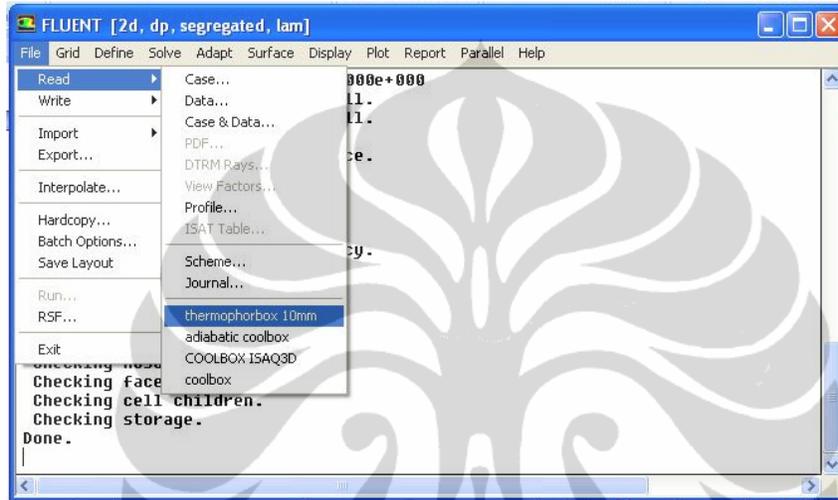
Setelah menentukan pendefinisian kondisi aliran dan fisik fluida dan partikel, maka langkah selanjutnya adalah memasukkan data yang telah didefinisikan tersebut ke dalam program Fluent, yaitu sebagai berikut :

- Pembuatan model geometri dan grid.
- Pemilihan model *solver* yang tepat untuk model yang telah dibuat.
- Import grid.
- Pemeriksaan grid.
- Pemilihan model solusi
- Pemilihan persamaan-persamaan yang akan dipergunakan sebagai *solver*.
- Menentukan sifat-sifat material yang dipergunakan baik solid atau liquid.
- Menentukan kondisi batas (*boundary condition*).
- Setting parameter-parameter solusi yang tepat.
- Inialisasi medan aliran.
- Perhitungan solusi.
- Pemeriksaan hasil.

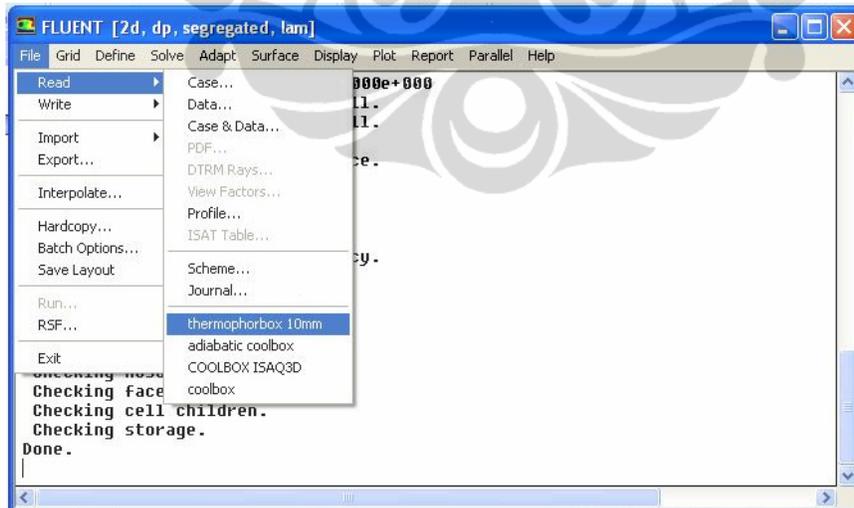
- Jika diperlukan, melakukan penghalusan terhadap mesh yang ada untuk kemudian disimulasi ulang.

Langkah-langkah tersebut di atas dilakukan pada menu yang tersedia pada *software* Fluent.

Langkah simulasi dengan menggunakan Fluent, beberapa tampilannya dapat dilihat pada **Gambar 3.17 – 3.23**.



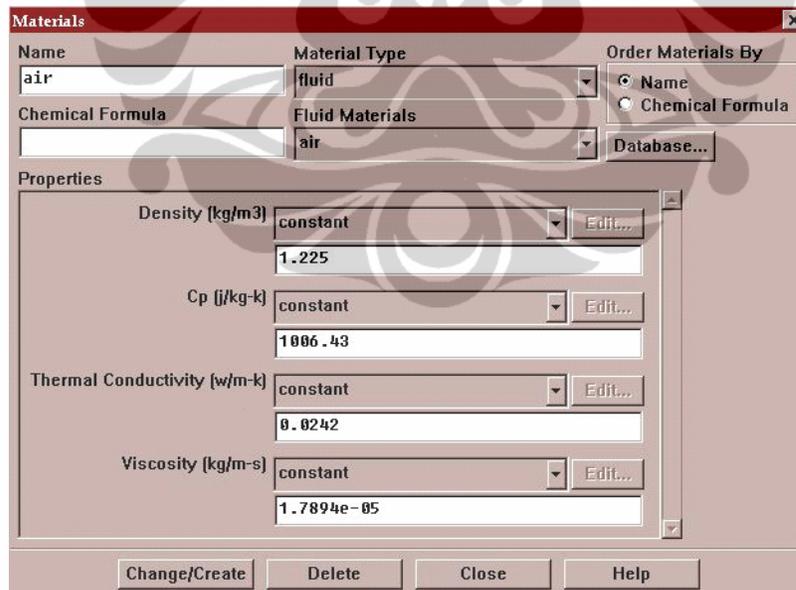
Gambar 3.17 Langkah simulasi Fluent, import grid



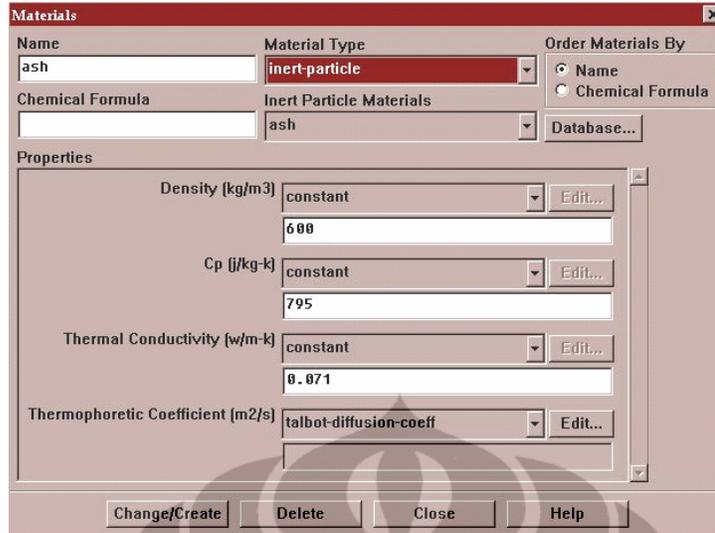
Gambar 3.18 Langkah simulasi Fluent, pemilihan model solver



Gambar 3.19 Langkah simulasi Fluent, discrete phase modelling



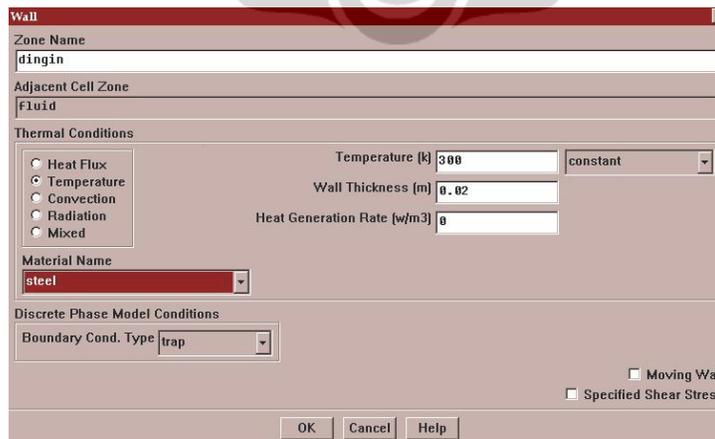
Gambar 3.20 Input data udara



Gambar 3.21 Input data partikel



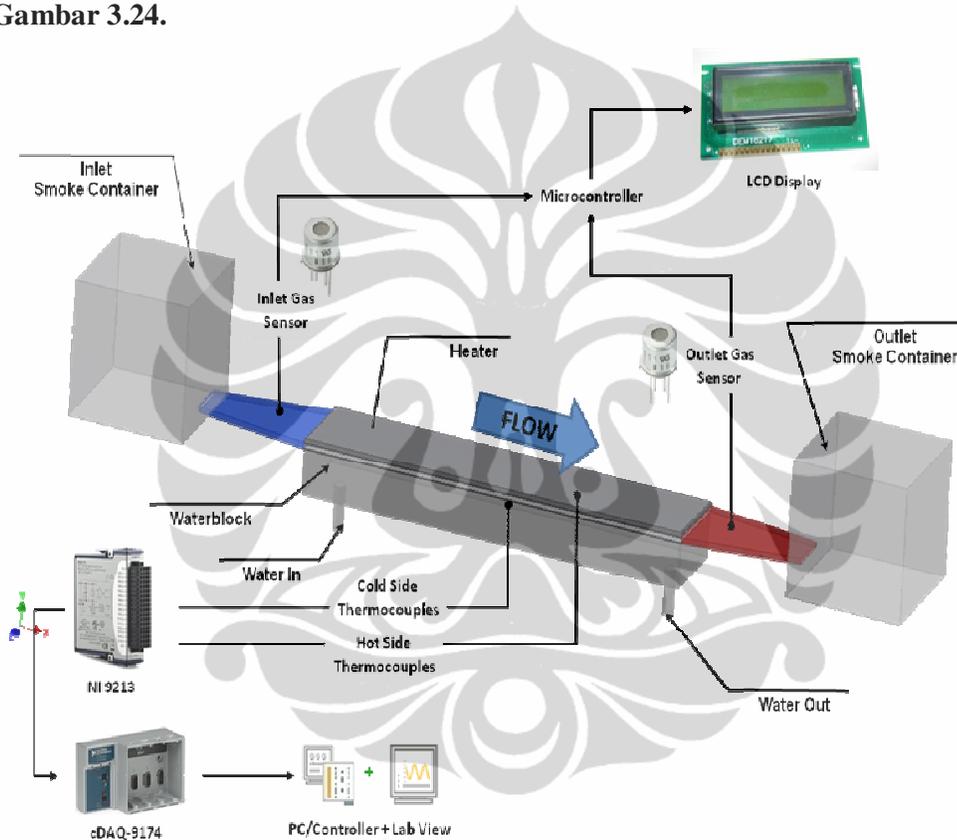
Gambar 3.22 Input data plat panas



Gambar 3.23 Input data plat dingin

3.4. PENGEMBANGAN THERMAL PRECIPITATOR

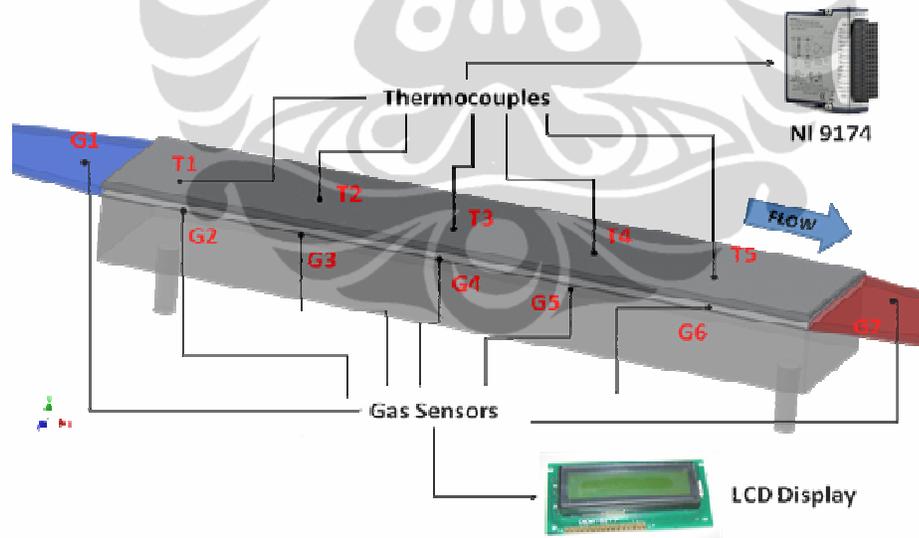
Tahap akhir dari penelitian ini adalah pengembangan alat pengumpul partikel (asap/debu) berbasis *thermophoretic force* atau disebut dengan istilah *thermal precipitator*. Penelitian *thermal precipitator* ini diharapkan dapat membantu mengendalikan dan mengurangi pencemaran udara. Oleh karena itu langkah yang harus dilakukan adalah menginvestigasi dan mengkarakterisasi *thermal precipitator*. Desain awal alat uji *thermal precipitator* dapat dilihat pada **Gambar 3.24**.



Gambar 3.24. Skema alat uji *thermal precipitator*

Seperti yang terlihat pada **Gambar 3.24.**, peralatan uji terdiri dari *box/container* penampung asap (sisi *inlet* dan *outlet*), *test section*, *heater*, *water block*, *gas sensor* TGS 2600, penguat sinyal mikrokontroler, *display/LCD*, *voltage regulator*, *data acquisition* NI9213, dan termokopel tipe-K. Partikel yang digunakan adalah tipe *aerosol smoke* dengan spesifikasi yang dilihat pada **Tabel 3.1**.

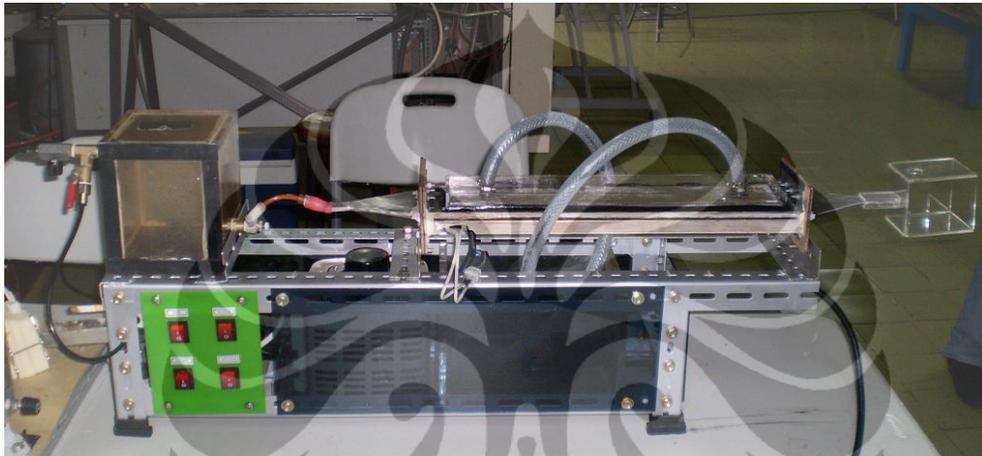
Aerosol smoke ditampung pada *box* penampung yang terbuat dari akrilik, di dalam *box* ini ditempatkan satu buah gas sensor yang berfungsi untuk melihat kadar kepekatan asap di dalam udara. Kemudian melalui *inlet section*, asap mengalir ke dalam *test section* yang terdiri dari 2 buah plat *stainless steel*. Salah satu plat tersebut ditempelkan *heater* yang berfungsi untuk mengatur temperatur sisi panas plat. Untuk mengatur temperatur pemanas tersebut digunakan *voltage regulator*. Dimensi plat *test section* ini adalah 15 cm x 50 cm. Jarak antar kedua buah plat adalah 5 mm. Kecepatan rata-rata udara di dalam *test section* adalah 5-10 cm/detik sesuai dengan standar baku mutu kecepatan udara dan Arismunandar [33]. Untuk menjaga agar temperatur sisi dingin plat stabil, maka dialirkan air pendingin ke sisi plat dingin. Temperaturnya dijaga stabil 300 K. Asap akan terdeposit pada plat di sisi dingin, sehingga dengan mudah dapat diketahui kadar asap yang keluar dari *test section* melalui gas sensor yang ditempatkan di *outlet section*. Data yang diterima oleh gas sensor akan dikirim ke mikrokontroler yang kemudian ditampilkan pada layar LCD dalam bentuk digital. 7 (tujuh) gas sensor ditempatkan pada *test section* seperti yang terlihat pada gambar **Gambar 3.25**.



Gambar 3.25. Alat uji dan gas sensor

Variasi data perbedaan temperatur (ΔT) antara plat panas dan plat dingin di-set sebagai berikut : 0° , 5° , 10° , 15° , 50°C . Namun untuk menghindari dualisme makna perbedaan temperatur (ΔT) dalam *thermophoresis* karena jika temperatur plat panas (T_2) = 50°C dan temperatur plat dingin (T_1) = 27°C , maka $\Delta T = T_2 - T_1$

= 23 °C. ΔT 23 °C bisa juga dimaknai $T_2 = 100$ °C dan $T_1 = 77$ °C, padahal kedua hal tersebut memiliki pengaruh radiasi dan konveksi yang berbeda. Oleh karena itu penulis membuat parameter baru non dimensional, yaitu T^* . Dimana $T^* = (T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}})/T_{\text{hot}} = (T_2 - T_1)/T_2$. Untuk mengukur temperatur digunakan termokopel tipe – K. Pengumpulan data temperatur digunakan *data acquisition system* (NI cDAQ-9174) seperti yang terlihat pada **Gambar 3.25.**, dan photo peralatan uji dapat dilihat pada **Gambar 3.26.**



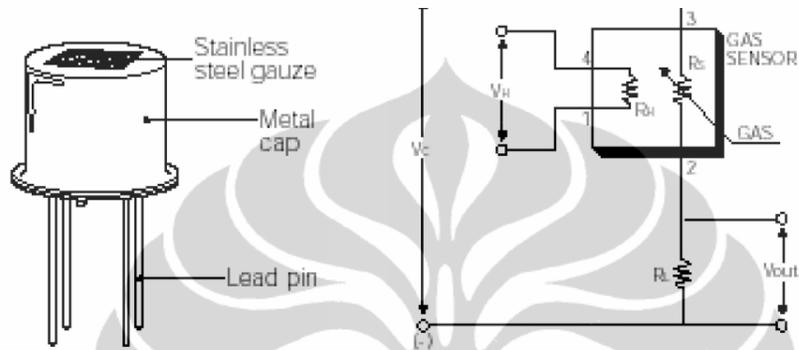
Gambar 3.26. Photo alat uji *thermal precipitator*

3.4.1. Metode Pengukuran

Parameter yang sangat penting dalam mengkarakterisasi alat ini adalah metode pengukuran. Pada penelitian ini, peneliti melakukan pengukuran konsentrasi partikel atau asap yang terdeposit pada plat dengan menggunakan gas sensor dan *particle counter*.

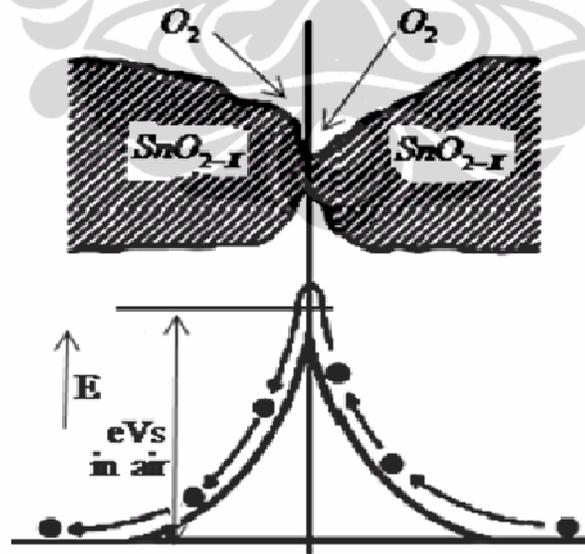
Tipe sensor yang digunakan adalah Figaro TGS 2600 (**Gambar 3.27**) yang memang didisain untuk mengukur konsentrasi polusi yang banyak terjadi di dalam ruangan seperti asap rokok. Sensor ini biasa digunakan untuk mendeteksi keberadaan gas. Sensor ini bisa diaplikasikan sebagai alarm dan juga bisa untuk mengukur konsentrasi gas tergantung rangkaian *microcontroller* yang digunakan. Sensor ini mempunyai nilai resistansi R_s , yang akan berubah bila terkena gas, juga mempunyai sebuah pemanas (*heater*) yang digunakan untuk membersihkan ruangan sensor dari kontaminasi udara luar. Spesifikasi gas sensor ini adalah sebagai berikut :

- o Merk = figaro
- o Model = TGS 2600
- o Detection Range = 0 ~ 30 ppm of H_2
- o Voltage = 5.0 ± 0.2 V DC/AC
- o Sensor Resistance = 10k ~ 90k Ω in air



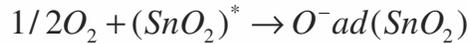
Gambar 3.27 Gas sensor Figaro 2600

Output tegangan pada hambatan RL (V_{out}) digunakan sebagai masukan pada mikroprosesor. Bahan detektor gas dari sensor adalah metal oksida, khususnya senyawa SnO_2 . Seperti yang terdapat pada **Gambar 3.28.** dan **Gambar 3.29.**

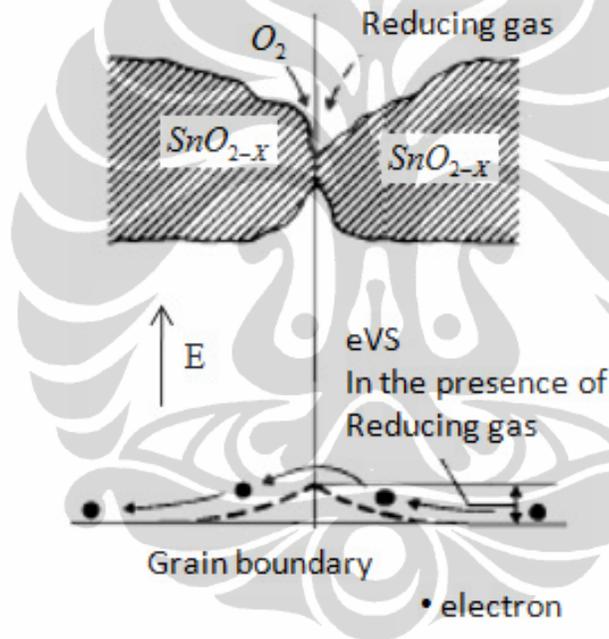


Gambar 3.28. Ilustrasi penyerapan oksigen oleh sensor

Ketika kristal metal oksida (SnO_2) dihangatkan pada temperatur tertentu, oksigen akan diserap pada permukaan kristal dan oksigen akan bermuatan negatif, proses penyerapan oksigen oleh sensor dapat dilihat dari persamaan kimia berikut ini :

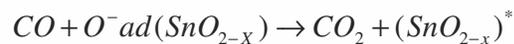


Hal ini disebabkan karena permukaan kristal mendonorkan elektron pada oksigen yang terdapat pada lapisan luar, sehingga oksigen akan bermuatan negatif dan muatan positif akan terbentuk pada permukaan luar kristal. Tegangan permukaan yang terbentuk akan menghambat laju aliran elektron.



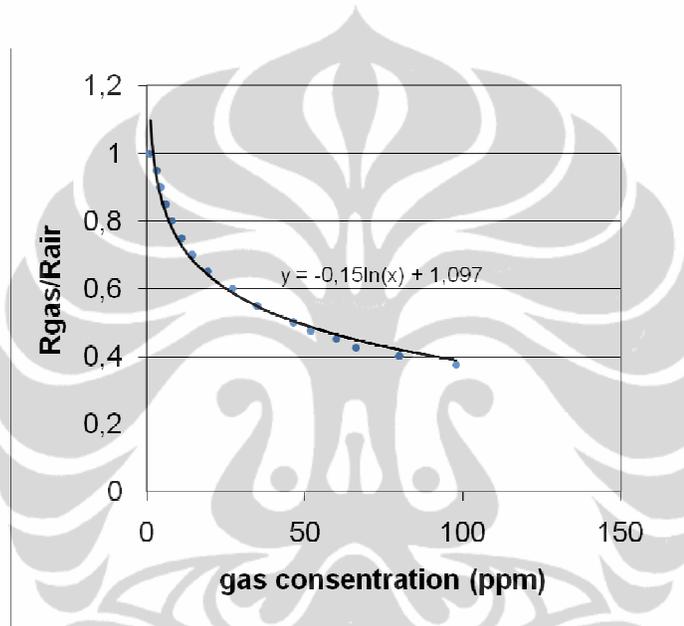
Gambar 3.29. Ilustrasi ketika terdeteksi adanya gas

Di dalam sensor, arus elektrik mengalir melewati daerah sambungan (*grain boundary*) dari kristal SnO_2 . Pada daerah sambungan, penyerapan oksigen mencegah muatan untuk bergerak bebas. Jika konsentrasi gas menurun, proses deoksidasi akan terjadi, rapat permukaan dari muatan negatif oksigen akan berkurang, dan mengakibatkan menurunnya ketinggian penghalang dari daerah sambungan, misal terdapat adanya gas CO yang terdeteksi maka persamaan kimianya sebagai berikut :



Nilai yang didapat dari gas sensor masih dalam berupa tegangan R_{gas}/R_{air} , maka untuk mendapatkan jumlah partikelnya, nilai R_{gas}/R_{air} harus dikonversikan ke dalam ppm (*part per million*) dengan menggunakan grafik seperti yang terlihat pada **Gambar 3.30**.

Data yang diterima oleh gas sensor akan dikirim ke mikrokontroler yang kemudian ditampilkan pada layar LCD dalam bentuk digital. Photo dapat dilihat unit gas sensor beserta displaynya dapat dilihat pada **Gambar 3.31**.



Gambar 3.30. Grafik hubungan antara R_{gas}/R_{air} Vs gas concentration



Gambar 3.31. Photo gas sensor, mikrokontroler, dan display

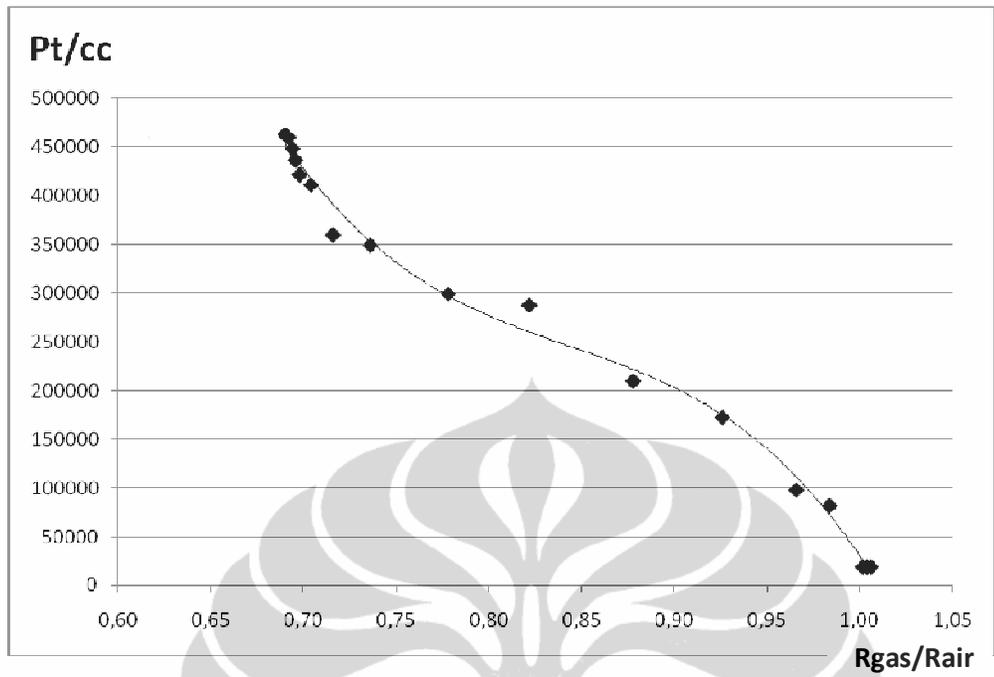
Standar ruang bersih (*cleanroom standards*) yang dikeluarkan oleh US FED STD 209E maupun ISO 14644-1 FED STD 209E menggunakan satuan $\text{particle}/\text{m}^3$ atau $\text{particle}/\text{ft}^3$. Oleh karena itu peneliti kemudian mengkonversikan data partikel tersebut menjadi $\text{particle}/\text{cm}^3$ (pt/cc) dengan menggunakan *particle counter* P-TRACK 8525.

P-TRACK 8525 memiliki spesifikasi sebagai berikut :

- *Model* : *Model 8525 P-Trak™ Ultrafine Particle Counter*
- *Concentration range* : *0 to 5×10^5 particles/cm³*
- *Particle size range* : *0,02 to greater than 1 μm*
- *Operation temperature range* : *0 to 38 °C*
- *Memory, single points* : *470 points*
- *Data logging* : *Adjustable interval (up to 1,000 hours of data at 1 minute intervals). Storage of up to 141 separate tests*
- *Power requirement* : *6 AA alkaline*
- *Size* : *27 cm x 14 cm x 14 cm*
- *Weight* : *1.7 kg*
- *Accuracy* : *0.01%.*

Proses kalibrasi dari gas sensor ke *particle counter* dilakukan dengan kondisi yang sama pada saat eksperimen (pengambilan data). Grafik pada **Gambar 3.32.** memperlihatkan proses kalibrasi tersebut. Dari hasil kalibrasi didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$y = - (3e+7)x^3 + (7e+7)x^2 - (6e+7)x + (2e+7), \text{ dengan simpangan deviasi } R^2 = 0,994.$$



Gambar 3.32. Grafik kalibrasi gas sensor menjadi pt/cc

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. HASIL UJI FENOMENA THERMOPHORESIS PLAT VERTIKAL

4.1.1. Tebal Lapisan Batas Temperatur (*Thermal Boundary Layer*)

Sebelum melakukan pengambilan data, dilakukan perhitungan tebal lapisan batas temperatur (*thermal boundary layer*) untuk memastikan bahwa jarak antar plat panas dan dingin tidak lebih kecil dari tebal lapisan batas tersebut. Hal ini menjadi bahan pertimbangan agar pengaruh *buoyancy force* dapat dihindari. Data yang diperlukan adalah sebagai berikut :

- Kecepatan partikel, u : 10 m/s
- Viskositas kinematik udara pada 65 °C, ν : 0,00001971 m²/s
- Panjang plat, x : 0,1 m
- Bilangan Prandtl, Pr : 0,7006
- Gravitasi, g : 9,8 m/s²
- Temperatur plat panas rata-rata, T_w : 100 °C
- Temperatur ambient, (T_∞) : 30 °C

Kemudian dihitung bilangan Grashof (Gr_x) dengan menggunakan persamaan 2.9 sebagai berikut :

$$Gr_x = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)x^3}{\nu^2}$$

Koefisien muai volume, β sebagai berikut :

$$\beta = \frac{1}{T} = \frac{1}{338} = 0,00295858K^{-1}$$

$$Gr_x = \frac{9,8 \cdot 0,00295828 \cdot (100 - 30) \cdot 0,1^3}{(1,971 \cdot 10^{-5})^2}$$

$$Gr_x = 5,223 \times 10^6$$

Kemudian untuk menghitung tebal lapisan batas (δ) dengan menggunakan persamaan 2.8 sebagai berikut :

$$\frac{\delta}{x} = 3,93 \text{Pr}^{-1/2} (0,952 + \text{Pr})^{1/4} Gr_x^{-1/4}$$

$$\frac{\delta}{0,1} = 3,93 \cdot 0,7006^{-1/2} \cdot (0,952 + 0,7006)^{1/4} \cdot (5,223 \cdot 10^6)^{-1/4}$$

$$\delta = 0,011136 \text{ m}$$

Tebal lapisan batas maksimum sebesar 0,011136 m atau 11,136 mm. Pada pengujian plat vertikal ini, jarak antar plat panas dan dingin di-set 40 mm, 45 mm, dan 50 mm.

Untuk melihat pengaruh konveksi alamiah (bilangan Grashof) dan konveksi paksa (bilangan Reynolds), maka perlu dihitung perbandingan bilangan Grashof dengan bilangan Reynolds kuadratnya, yaitu :

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

$$Re = \frac{10 \cdot 0,1}{0,00001971} = 50.735,67$$

$$\frac{Gr_x}{Re^2} = \frac{5,223 \cdot 10^6}{50735,67^2} = 0,002$$

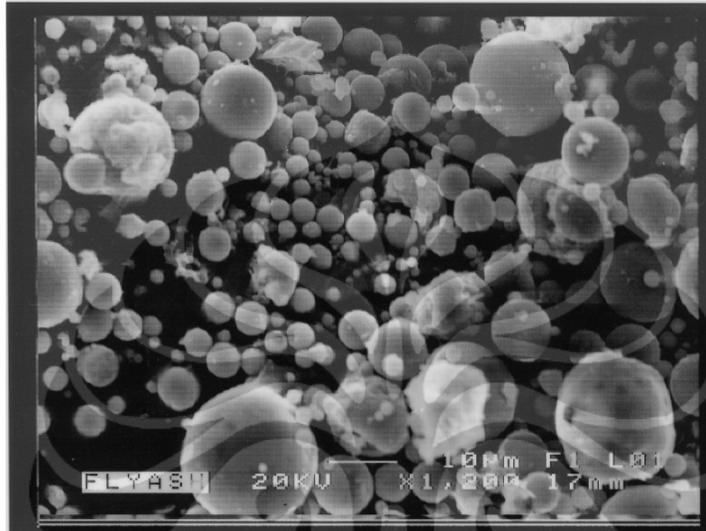
Bila melihat perbandingan kedua bilangan tersebut dan persamaan (2.12a), maka konveksi alamiah boleh diabaikan. Dengan demikian pengaruh *buoyancy force* sangat kecil, sehingga sangat besar kemungkinan ada pengaruh gaya lain yang menyebabkan pergerakan partikel.

4.1.2. Kalibrasi Termokopel

Seperti sudah dijelaskan pada subbab 3.2.1. tentang termokopel dan kalibrasi, pada bagian ini hanya ditampilkan data hasil kalibrasi termokopel. Ada 6 buah termokopel yang digunakan, dan hasil kalibrasinya dapat dilihat pada **Lampiran 4.**

4.1.3. Hasil Pengujian Plat Vertikal

Partikel yang digunakan pada pengujian plat vertikal ini adalah jenis abu terbang (*fly ash*) yang didapatkan dari PLTU Suralaya. Diameter rata-rata *fly ash* adalah 10 μm dapat dilihat pada **Gambar 4.1**. Spesifikasi *fly ash* tersebut dapat dilihat pada **Tabel 4.1**.



Gambar 4.1. Photo SEM fly ash

Tabel 4.1. Spesifikasi Fly Ash

Kandungan	BUKIT ASAM (% by wt)
<i>Silica (SiO₂)</i>	59,4
<i>Iron (Fe₂O₃)</i>	4,6
<i>Aluminium Oxid (Al₂O₃)</i>	24,7
<i>Calcium Oxide (CaO)</i>	3,1
<i>Magnesium Oxide (MgO)</i>	1,7
<i>Sodium Oxide (Na₂O)</i>	2,5
<i>Pottassium Oxide (K₂O)</i>	0,5
<i>Shulpur Oxide (SiO₃)</i>	2,3
<i>Titanium Dioxide (TiO₂)</i>	0,8
<i>Phospathe Pentoxide (P₂O₅)</i>	0,4

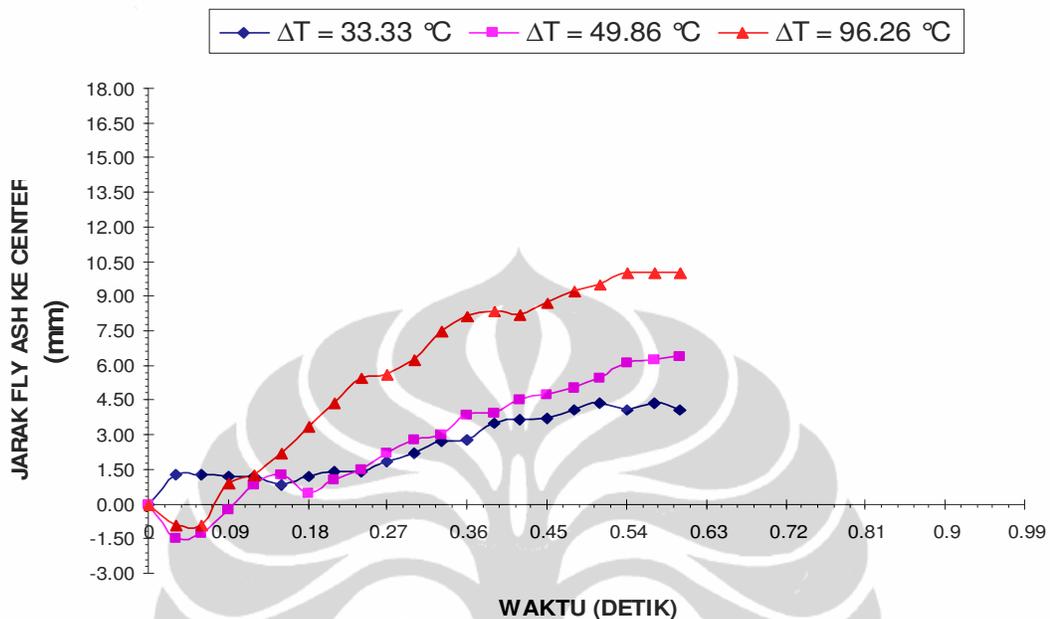
Pengambilan data dilakukan secara visual dengan menggunakan video kamera. File hasil rekaman objek *fly ash* yang awalnya dalam bentuk *movie file*, selanjutnya diubah menjadi *JPEG Image* yang dilakukan dengan bantuan *software* PINNACLE STUDIO PLUS Versi 9. *JPEG Image* nantinya akan disebut sebagai *frame*. *Movie file* akan menjadi *frame* untuk setiap 1/30 detik atau 0,03 detik. Hasil yang didapat adalah *frame-frame* yang menunjukkan node-node dari pergerakan *fly ash*. Satu *frame* adalah satu node gerakan *fly ash*.

Setelah *frame-frame* didapat, langkah selanjutnya adalah mencari besarnya jarak node-node *fly ash* ke center (*particle feeder*) untuk setiap *frame* tersebut. Proses ini dimaksudkan untuk menggambarkan grafik pergerakan *fly ash*. Grafik hasil pengujian dapat dilihat pada **Tabel 4.2. – 4.3.** dan **Gambar 4.2. – 4.5.**

Tabel 4.2. Pergerakan Partikel pada Jarak Antar Plat, L = 40 mm

Waktu (detik)	Pergerakan Partikel dari Center [mm]		
	$\Delta T = 33,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta T = 49,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta T = 96,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
0	0,000	0,000	-0,088
0,03	1,294	-1,463	-0,088
0,06	1,294	-1,247	0,875
0,09	1,177	-0,027	0,875
0,12	1,177	0,081	1,250
0,15	0,082	1,247	2,250
0,18	1,177	0,049	3,375
0,21	1,412	1,030	4,375
0,24	1,412	1,463	5,500
0,27	1,882	2,222	5,625
0,3	2,235	2,764	6,250
0,33	2,706	2,981	7,500
0,36	2,824	3,848	8,125
0,39	3,529	3,957	8,375
0,42	3,647	4,499	8,250
0,45	3,765	4,715	8,750
0,48	4,118	5,041	9,250
0,51	4,353	5,474	9,500
0,54	4,118	6,125	10,000
0,57	4,353	6,233	10,000
0,6	4,118	6,450	10,000

L= 40 mm



Gambar 4.2. Pergerakan Fly Ash ke Plat Dingin diukur dari center pada L=40 mm

Seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 4.2.**, bahwa untuk jarak antar plat panas dan dingin 40 mm, semua pergerakan partikel memiliki kecenderungan yang sama, yaitu bergerak menuju ke plat yang memiliki temperatur yang lebih rendah (dingin) baik untuk ΔT 33,33 °C, 49,86 °C dan 96,26 °C. Bila diambil pada kondisi waktu yang sama, misalnya pada waktu ke 0,6 detik, untuk ΔT = 33,33 °C partikel bergerak ke temperatur yang lebih rendah sampai sejauh lebih kurang 4,12 mm, sedangkan untuk ΔT = 49,6 °C partikel bergerak ke temperatur yang lebih rendah sampai sejauh lebih kurang 6,45 mm, dan untuk ΔT = 96,26 °C partikel bergerak ke temperatur yang lebih rendah sampai sejauh lebih kurang 10,00 mm. Semakin besar perbedaan temperatur, maka semakin jauh pergerakan partikel. Boleh dikatakan bahwa ada fenomena thermophoresis yang cukup signifikan.

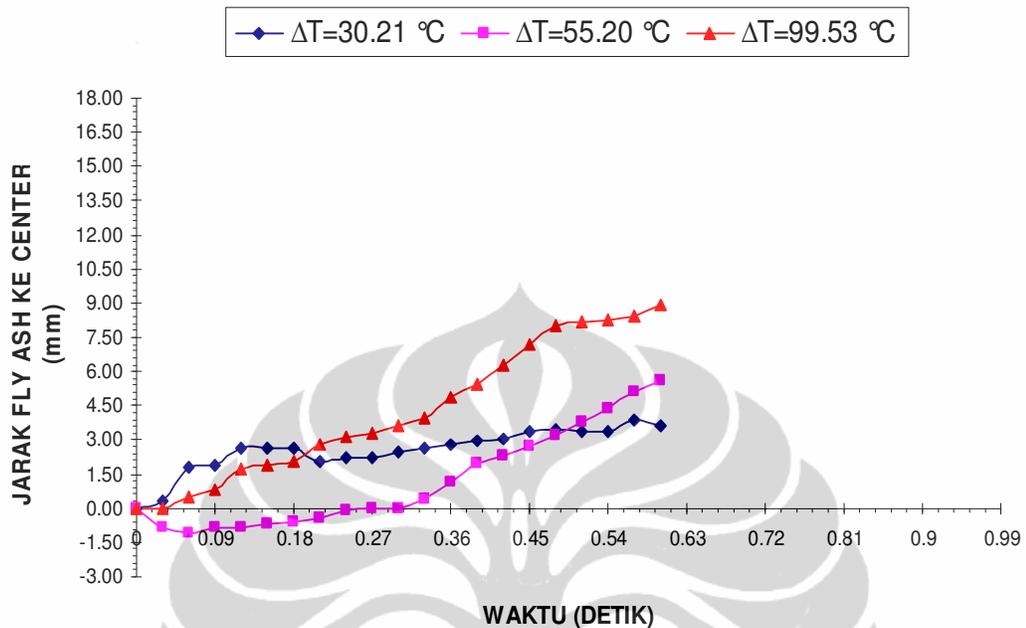
Namun pada waktu detik ke 0,09, ada pergerakan partikel yang menuju ke plat panas (-) yaitu untuk ΔT = 49,6 °C dan 96,26 °C. Hal ini barangkali bisa disebabkan karena pengaruh *buoyancy force* walaupun tidak besar. Jadi partikel

itu bergerak dulu ke daerah yang memiliki density yang lebih rendah. Dengan berjalannya waktu pengaruh *buoyancy force* itu berkurang dan partikel bergerak menuju plat dingin, artinya *thermophoretic force* ini sangat dominan.

Tabel 4.3. Pergerakan Partikel pada Jarak Antar Plat, L = 45 mm

Waktu (detik)	Pergerakan Partikel dari Center [mm]		
	$\Delta T = 30,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta T = 55,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta T = 96,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
0	0,000	0,000	0,000
0,03	0,338	0,084	0,000
0,06	1,800	-1,125	0,047
0,09	1,913	-0,084	0,078
0,12	2,588	-0,084	1,719
0,15	2,588	-0,070	1,875
0,18	2,588	-0,056	2,031
0,21	2,025	-0,042	2,813
0,24	2,250	-0,014	3,125
0,27	2,250	0,000	3,281
0,3	2,475	0,000	3,594
0,33	2,588	0,042	3,906
0,36	2,813	1,125	4,844
0,39	2,925	1,969	5,469
0,42	3,038	2,250	6,250
0,45	3,375	2,672	7,188
0,48	3,488	3,234	7,969
0,51	3,375	3,797	8,125
0,54	3,375	4,359	8,281
0,57	3,825	5,063	8,438
0,6	3,600	5,625	8,906

L= 45 mm



Gambar 4.3. Pergerakan Fly Ash ke Plat Dingin diukur dari center pada L=45 mm

Pada **Gambar 4.3.** terlihat bahwa untuk jarak antar plat 45 mm boleh dibilang memiliki kecenderungan yang sama dengan jarak antar plat 40 mm. Begitu juga dengan $\Delta T = 30,21$ °C, 55,20 °C dan 99,53 °C, semakin besar beda temperatur, maka semakin jauh pergerakan partikel untuk waktu yang sama.

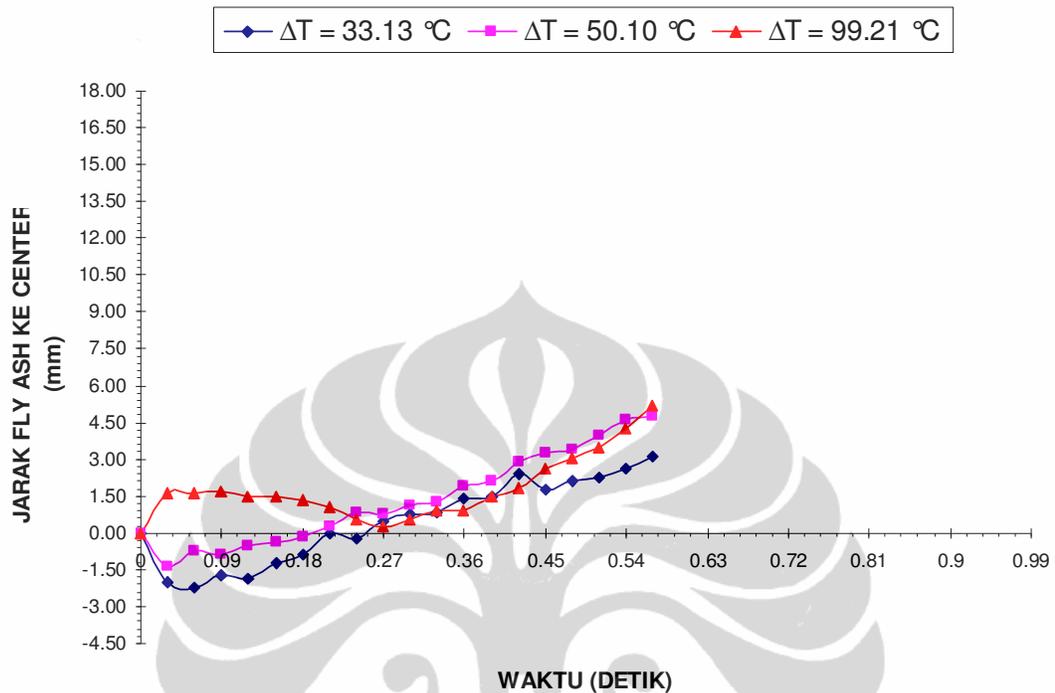
Namun ada perbedaan sedikit antara plat berjarak 40 mm dan 45 mm. Pada waktu ke 0,6 detik dan $\Delta T = 30,21$ °C partikel bergerak ke plat dingin untuk L = 45 mm sebesar 3,60 mm, sedangkan untuk L = 40 mm sebesar 4,12 mm. Pada $\Delta T = 55,20$ °C partikel bergerak ke plat dingin untuk L = 45 mm sebesar 5,625, sedangkan untuk L = 40 mm sebesar 6,449 mm. Pada $\Delta T = 99,2$ °C partikel bergerak ke plat dingin untuk L = 45 mm sebesar 8,906, sedangkan untuk L = 40 mm sebesar 10 mm. Bisa dikatakan bahwa jarak antar plat mempengaruhi *thermophoretic force*, makin jauh jarak antar permukaan perpindahan panas, maka makin kecil pengaruh *thermophoretic force*.

Terlihat juga dari **Gambar 4.3.**, masih ada pengaruh *buoyancy force* di awal waktu untuk $\Delta T = 55,2$ °C.

Tabel 4.4. Pergerakan Partikel pada Jarak Antar Plat, L = 50 mm

Waktu (detik)	Pergerakan Partikel dari Center [mm]		
	$\Delta T = 33,1 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 50,1 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T = 99,2 \text{ }^\circ\text{C}$
0	0,000	0,000	0,000
0,03	-2,000	-1,375	1,588
0,06	-2,250	-0,075	1,588
0,09	-1,750	-0,088	1,721
0,12	-1,875	-0,050	1,456
0,15	-1,250	-0,038	1,456
0,18	-0,088	-0,013	1,324
0,21	0,000	0,025	1,059
0,24	-0,025	0,088	0,053
0,27	0,050	0,075	0,026
0,3	0,075	1,125	0,053
0,33	0,088	1,250	0,093
0,36	1,375	1,875	0,093
0,39	1,500	2,125	1,456
0,42	2,375	2,875	1,853
0,45	1,750	3,250	2,647
0,48	2,125	3,375	3,044
0,51	2,250	4,000	3,441
0,54	2,625	4,625	4,235
0,57	3,125	4,750	5,162
0,6		5,125	5,559

L = 50 mm



Gambar 4.4. Pergerakan Fly Ash ke Plat Dingin diukur dari center pada L= 50 mm

Gambar 4.4. memperlihatkan pergerakan partikel untuk jarak antar plat L = 50 mm. Walaupun pergerakan partikel menuju ke arah plat dingin, namun pergerakannya tidak sejauh L = 40 mm, dan L = 45 mm. Bila dilihat pada kondisi waktu yang sama, misalnya pada waktu ke 0,57 detik, untuk $\Delta T = 33,13 \text{ }^\circ\text{C}$ partikel bergerak ke plat dingin lebih kurang 3,12 mm, untuk $\Delta T = 50,10 \text{ }^\circ\text{C}$ partikel bergerak ke plat dingin lebih kurang 4,75 mm, dan untuk $\Delta T = 99,2 \text{ }^\circ\text{C}$ partikel bergerak ke plat dingin lebih kurang 5,16 mm. Terlihat memang jarak antar permukaan perpindahan panas sangat mempengaruhi *thermophoretic force*.

Hal yang sama juga terjadi sampai waktu detik ke 0,18, pergerakan partikel untuk $\Delta T = 50,1 \text{ }^\circ\text{C}$ dan $99,2 \text{ }^\circ\text{C}$ bergerak ke plat panas lebih kurang sejauh 2 mm. Seperti diungkapkan sebelumnya bahwa fenomena ini dipengaruhi oleh *buoyancy force*.

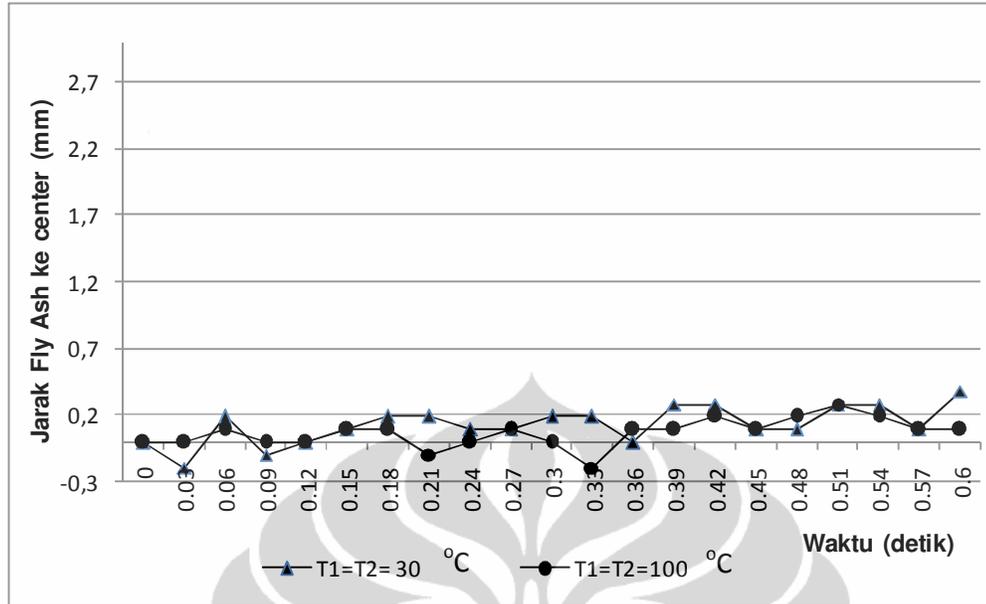
Untuk lebih memperkuat hipotesa *thermophoretic force* ini, dilakukan juga pengujian untuk $\Delta T = 0^\circ\text{C}$. Namun pada kenyataannya sulit mendapatkan

perbedaan temperatur 0°C . Dari hasil pengukuran didapatkan $\Delta T = 0,68^{\circ}\text{C}$ dimana kedua plat berada pada temperatur lingkungan dan $\Delta T = 0,78^{\circ}\text{C}$ dimana kedua buah plat diberikan pemanas hingga mencapai temperatur 100°C . Pengujian ini hanya dilakukan untuk jarak antar plat panas dan dingin $L = 50\text{ mm}$. Data hasil pengujian dapat dilihat pada **Tabel 4.5.** dan **Gambar 4.5.**

Tabel 4.5. Pergerakan Partikel pada Jarak Antar Plat, $L = 50\text{ mm}$, $\Delta T = 0^{\circ}\text{C}$

Waktu (detik)	Pergerakan Partikel dari Center [mm]	
	$\Delta T = 0,68^{\circ}\text{C}$ No Heater	$\Delta T = 0,78^{\circ}\text{C}$ With Heater
0	0	0
0.03	-0,1907	0
0.06	0,1907	0,0954
0.09	-0,0953	0
0.12	0	0
0.15	0,0953	0,0954
0.18	0,1907	0,0954
0.21	0,1907	-0,0954
0.24	0,0953	0
0.27	0,0953	0,0954
0.3	0,1907	0
0.33	0,1907	-0,1908
0.36	0	0,0954
0.39	0,286	0,0954
0.42	0,286	0,1908
0.45	0,0953	0,0954
0.48	0,0953	0,1908
0.51	0,286	0,2863
0.54	0,286	0,1908
0.57	0,0953	0,0954
0.6	0,3814	0,0954

Seperti terlihat pada **Gambar 4.5.**, bahwa tidak ada pergerakan partikel yang signifikan ke arah plat dingin maupun plat panas. Hal ini boleh dikatakan bahwa tidak ada *thermophoretic force* atau dengan kata lain fenomena *thermophoresis* sangat tergantung pada perbedaan temperatur antar kedua plat (region).



Gambar 4.5. Pergerakan partikel ke plat dingin diukur dari center pada $\Delta T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $L = 50\text{ mm}$

4.2. HASIL UJI FENOMENA THERMOPHORESIS PLAT HORISONTAL

Ada beberapa pengembangan dari alat uji sebelumnya (plat vertikal), berdasarkan studi literatur, maka pada plat horisontal ini jarak antar plat panas dan plat dingin dikurangi, sehingga perbedaan temperaturpun tidak terlalu besar. Hal ini juga sejalan dengan rencana pengembangan aplikasi dari *thermophoresis* di *indoor air quality* sebagai pengendali/control pencemaran udara. Oleh karena itu partikel yang digunakan pun disesuaikan dengan kondisi realnya, salah satunya adalah *aerosol smoke* dari jenis *tobacco*. Spesifikasi *aerosol smoke* dapat dilihat pada **Tabel 3.1**.

4.2.1. Tebal Lapisan Batas Temperatur (*Thermal Boundary Layer*)

Pengujian fenomena *thermophoresis* plat horisontal ini, sama halnya dengan pengujian pada plat vertikal, sebelum menentukan dimensi *test section* (alat uji) terlebih dahulu dihitung tebal lapisan batas temperatur (*thermal boundary layer*). Hal ini dilakukan agar dapat melihat distribusi temperatur antara plat panas dan plat dingin.

Untuk melihat distribusi temperatur yang berada di daerah lapisan batas termal (δ), perlu dicari terlebih dahulu tebal lapisan batas hidrodinamika. Tebal lapisan batas hidrodinamika (δ) pada jarak x (m) dengan kecepatan u (m/detik) dan viskositas kinematik ν mengacu kepada JP Holman adalah sebagai berikut :

$$\delta = 4,64 \sqrt{\frac{\nu \cdot x}{u}}, \text{ dimana } Re_x = \frac{u \cdot x}{\nu}, \text{ maka } \delta = \frac{4,64x}{\sqrt{Re_x}}$$

Maka tebal lapisan batas termal (δ_t) dirumuskan :

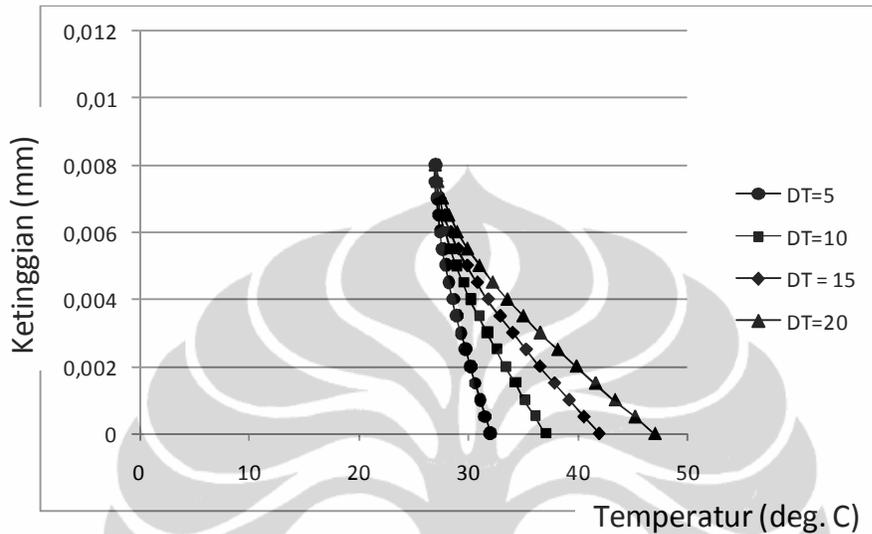
$$\delta_t = \frac{\delta}{1,026 \sqrt[3]{Pr}}$$

Setelah didapat tebal lapisan batas termal, maka dapat dihitung distribusi temperatur pada lapisan batas termal dengan menggunakan persamaan :

$$\frac{T - T_w}{T_\infty - T_w} = \frac{3}{2} \frac{y}{\delta_t} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{\delta_t} \right)^3$$

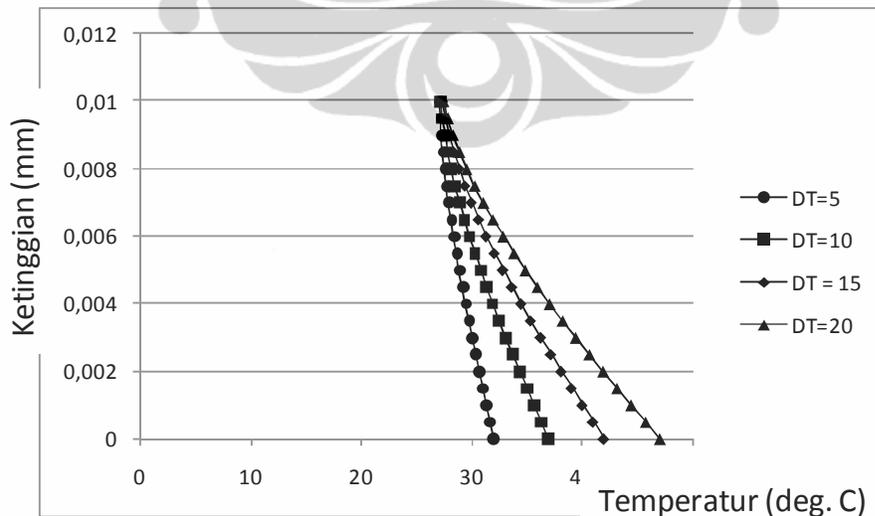
Sebagai contoh profil temperatur pada lapisan batas termal pada jarak $x = 10$ cm dapat dilihat pada grafik **Gambar 4.6.**, dan profil temperatur pada jarak $x = 20$ cm dapat dilihat grafik pada **Gambar 4.7**. Dari **Gambar 4.6**. terlihat bahwa tebal lapisan batas termal (δ_t), ketika mencapai temperatur infinit adalah sebesar

0,008 m atau 8 mm baik untuk $\Delta T = 5, 10, 15,$ dan $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sedangkan jarak antar plat panas dan plat dingin adalah 5 mm, temperatur udara yang mencapai plat dingin rata-rata sebesar $30,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, oleh karena itu untuk menjaga agar temperatur konstan pada plat dingin dialirkan air pendingin.



Gambar 4.6. Grafik Distribusi temperatur pada jarak $x = 10\text{ cm}$ (ket. $DT = \Delta T$)

Hasil yang serupa juga terlihat pada **Gambar 4.7.**, dimana tebal lapisan batas termal (δ), ketika mencapai temperatur infinit adalah sebesar 10 mm baik untuk $\Delta T = 5, 10, 15,$ dan $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan temperatur udara yang mencapai plat dingin rata-rata sebesar $34,05\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Gambar 4.7. Grafik Distribusi temperatur pada jarak $x = 20\text{ cm}$ (ket. $DT = \Delta T$)

Perbedaan temperatur terjadi pada setiap layer, dengan demikian maka akan ada gaya *thermophoretic* yang menyebabkan partikel akan bergerak ke daerah yang memiliki temperatur yang lebih rendah.

Kemudian untuk melihat pengaruh gaya apung (*buoyancy force*) terhadap *thermophoresis*, lebih dahulu difahami bahwa fluida dengan temperatur yang lebih tinggi akan mempunyai densitas yang lebih rendah dibandingkan dengan temperatur yang lebih rendah, sehingga fluida yang mempunyai densitas yang rendah akan naik dan digantikan dengan fluida yang mempunyai densitas yang lebih tinggi.

Gaya apung (*buoyancy force*) pada konveksi natural/bebas sangat tergantung pada bilangan Grashof. Bilangan Grashof memegang peranan penting dalam konveksi bebas sedangkan bilangan Reynolds berperan dalam konveksi paksa. Dimana bilangan Reynolds merupakan perbandingan antara gaya inersia (*inertia force*) dan gaya viscous (*viscous force*). Bilangan Grashof menunjukkan perbandingan gaya apung (*buoyancy force*) dengan gaya viscous (*viscous force*). Untuk menentukan peran kedua bilangan tersebut pada proses konveksi, maka dapat ditentukan dari perbandingan nilai *Grasshoff* dan nilai *Reynolds* kuadrat fluida tersebut (Incropera and De Witt), yaitu :

- $\frac{Gr}{Re^2} \ll 1$ Konveksi alamiah diabaikan
- $\frac{Gr}{Re^2} \sim 1$ Konveksi alamiah dan konveksi paksa dipertimbangkan
- $\frac{Gr}{Re^2} \gg 1$ Konveksi paksa diabaikan

Untuk menghitung bilangan non dimensional tersebut diperlukan data :

- | | | |
|--|-------|---------------------------------|
| - Kecepatan partikel, | u | : 0,5 m/s |
| - Viskositas kinematik udara pada 313 K, | ν | : 0,000017718 m ² /s |
| - Panjang plat, | x | : 0,1 m |
| - Bilangan Prandtl, | Pr | : 0,7036 |
| - Gravitasi, | g | : 9,8 m/s ² |

- Temperatur plat panas rata-rata, $T_w : 50\text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatur ambient, $T_{amb} : 30\text{ }^\circ\text{C}$

Kemudian dihitung bilangan Grashof (Gr_x) dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Gr_x = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)x^3}{\nu^2}$$

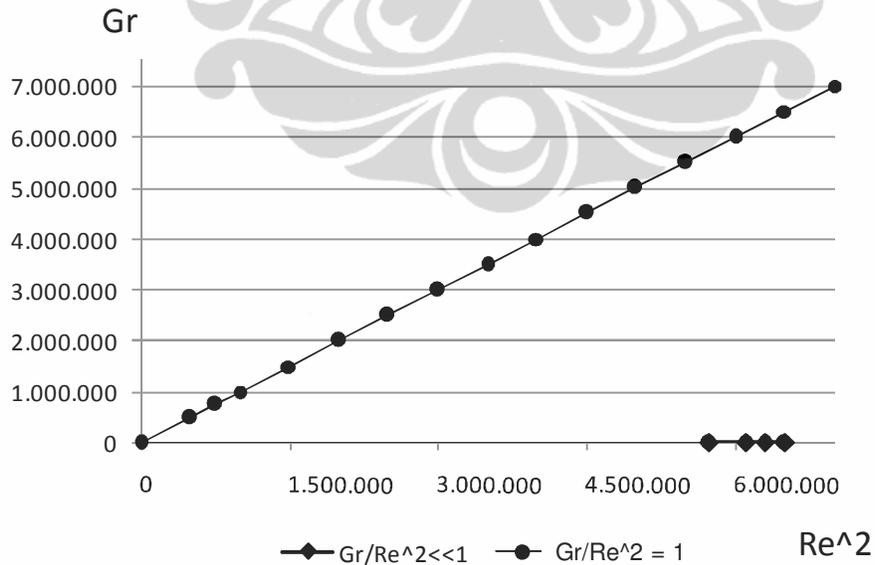
Koefisien muai volume, β sebagai berikut :

$$\beta = \frac{1}{T} = \frac{1}{313} = 0,003195\text{ K}^{-1}$$

Hasil perhitungan perbandingan antara bilangan Grashof dengan Reynolds kuadrat dapat dilihat pada **Tabel 4.6** dan **Gambar 4.8**.

Tabel 4.6. Perbandingan bilangan Grashof dengan bilangan Reynolds kuadrat

ΔT	Re^2	Nu	Gr	Pr
0	6.499.412	14,9578	0	0,708
5	6.293.981	14,8344	80	0,70745
10	6.098.890	14,7143	153	0,7069
15	5.912.372	14,5967	221	0,70635
20	5.734.282	14,4818	283	0,7058



Gambar 4.8. Grafik perbandingan nilai antara bilangan Grashof dengan bilangan Reynolds Kuadrat

4.2.2 Hasil Pengujian Plat Horisontal

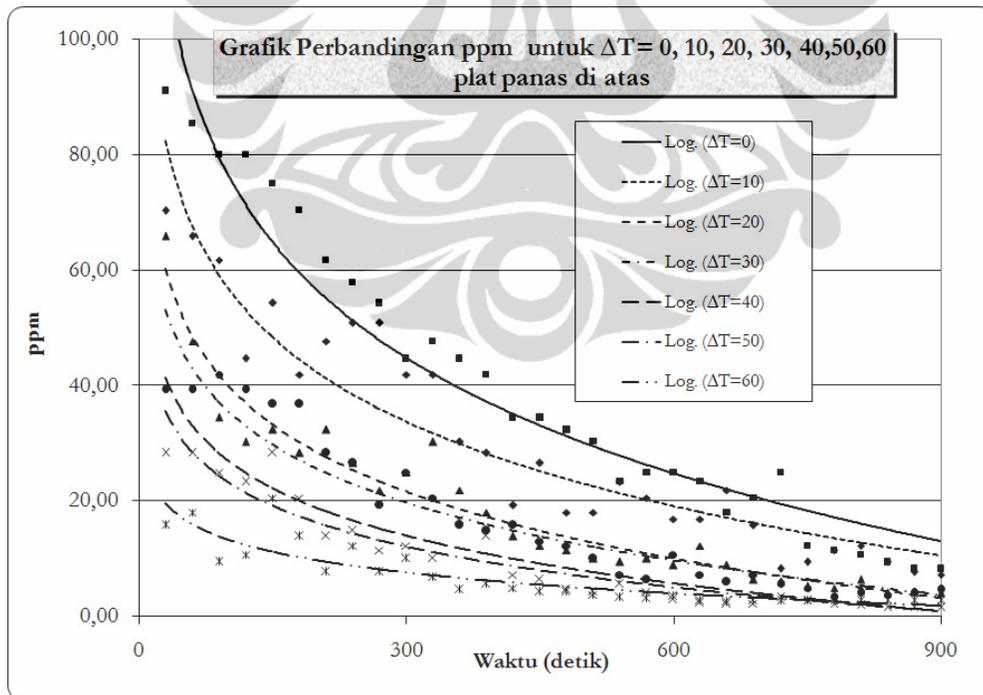
Pengujian plat horisontal peneliti menggunakan 2 (dua) metode pengukuran, yaitu yang pertama secara kualitatif atau visualisasi dengan menggunakan *digital camera*. Metode pengukuran sama seperti pada plat vertikal. Yang kedua secara kuantitatif dengan menggunakan gas sensor seperti yang dijelaskan pada **subbab 3.4.1**.

Peneliti lebih menampilkan data pengukuran secara kuantitatif. Data yang didapat dari hasil pengukuran tersebut masih dalam bentuk perbandingan tegangan $R_{\text{gas}}/R_{\text{air}}$. Kemudian data tersebut dikonversikan menjadi *gas concentration* dengan satuan *part per million* (ppm) dengan menggunakan grafik konversi pada **Gambar 3.30**. Data akhir hasil pengukuran ditampilkan pada **Tabel 4.7**, dan **4.8**, serta **Gambar 4.9**, dan **4.10**.

Seperti terlihat pada **Gambar 4.9**, grafik hasil pengujian untuk plat panas berada di atas, *aerosol smoke* dialirkan secara konstan lebih kurang 100 ppm yang terdeteksi oleh *gas sensor* yang ditempatkan pada sisi *inlet test section*. Kemudian pada sisi *outlet test section* ditempatkan juga *gas sensor*. Dapat dijelaskan pada gambar tersebut bahwa pada detik-detik awal terjadi penurunan partikel yang sangat signifikan khususnya pada $\Delta T = 60$ °C, tepatnya pada detik ke 30 hanya terdapat 15,88 ppm. Ini berarti tingkat efisiensinya mencapai 85%. Namun harus memiliki perbedaan temperatur yang lebih besar. Bila dibandingkan dengan data pada $\Delta T = 30$ °C, maka pada detik ke 30, jumlah partikel yang terdeteksi mencapai 39,3 ppm atau memiliki efisiensi sebesar 61%. Bisa disimpulkan bahwa bila ingin mendapatkan efisiensi yang lebih besar dalam waktu yang cepat, maka perbedaan temperatur harus lebih besar, artinya akan membutuhkan energi yang besar pula untuk pemanasnya (*heater*). Dan sebaliknya bila ingin hemat dalam energinya, maka efisiensinya akan rendah. Jika efisiensinya ingin besar maka harus membutuhkan waktu yang lebih lama. Lebih lengkapnya dapat dilihat pada **Tabel 4.7**. Semakin besar perbedaan temperatur, maka semakin sedikit jumlah partikelnya.

Tabel 4.7. Penurunan jumlah ppm untuk plat panas di atas.

Perbedaan Temperatur	Konversi	Waktu (detik)			
		0	30	60	90
$\Delta T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	Rgas/Rair	0,39	0,4	0,41	0,42
	ppm	97,26	91,16	85,45	80,09
$\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	Rgas/Rair	0,39	0,44	0,45	0,46
	ppm	97,26	70,37	65,96	61,82
$\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	Rgas/Rair	0,39	0,45	0,5	0,55
	ppm	94,16	65,96	47,72	34,53
$\Delta T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	Rgas/Rair	0,4	0,53	0,53	0,52
	ppm	91,16	39,3	39,3	41,93
$\Delta T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	Rgas/Rair	0,38	0,57	0,56	0,52
	ppm	100,45	30,33	32,36	41,93
$\Delta T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	Rgas/Rair	0,38	0,58	0,58	0,6
	ppm	100,45	28,43	28,43	24,98
$\Delta T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$	Rgas/Rair	0,38	0,67	0,65	0,75
	ppm	100,45	15,88	18,07	9,46



Gambar 4.9. Grafik perbandingan jumlah partikel per million (ppm) untuk plat panas di atas.

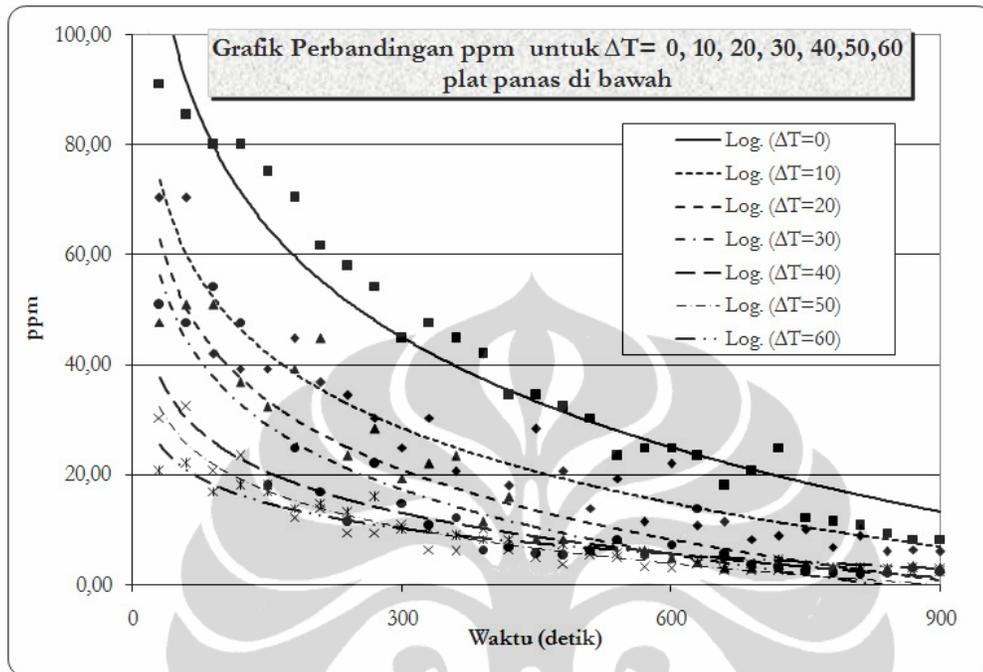
Data hasil pengujian untuk plat panas berada di bawah, boleh dikatakan hampir tidak ada perbedaan yang signifikan. Hasil lengkapnya dapat dilihat pada **Tabel 4.8.** dan **Gambar 4.10.** Pada $\Delta T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan detik ke 30, terjadi penurunan partikel yang sangat signifikan, hanya terdapat 20,57 ppm pada sisi *outlet*, artinya efisiensi mencapai 80%. Jadi hanya memiliki perbedaan 5% dengan posisi plat panas berada di atas. Begitu juga dengan $\Delta T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ detik ke 30, terdapat 50,9 ppm pada sisi *outlet*-nya.

Tabel 4.8. Penurunan jumlah ppm untuk plat panas di bawah.

Perbedaan Temperatur	Konversi	Waktu (detik)			
		0	30	60	90
$\Delta T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	Rgas/Rair	0,38	0,4	0,41	0,42
	ppm	99,16	91,16	85,45	80,09
$\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	Rgas/Rair	0,38	0,44	0,44	0,52
	ppm	99,16	70,37	70,37	41,93
$\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	Rgas/Rair	0,38	0,5	0,49	0,49
	ppm	99,16	47,72	50,91	50,91
$\Delta T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	Rgas/Rair	0,38	0,49	0,5	0,48
	ppm	99,16	50,91	47,72	54,32
$\Delta T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	Rgas/Rair	0,38	0,53	0,56	0,59
	ppm	99,16	39,3	32,36	26,65
$\Delta T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	Rgas/Rair	0,38	0,57	0,56	0,63
	ppm	99,16	30,33	32,36	20,57
$\Delta T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$	Rgas/Rair	0,38	0,63	0,62	0,66
	ppm	99,16	20,57	21,95	16,94

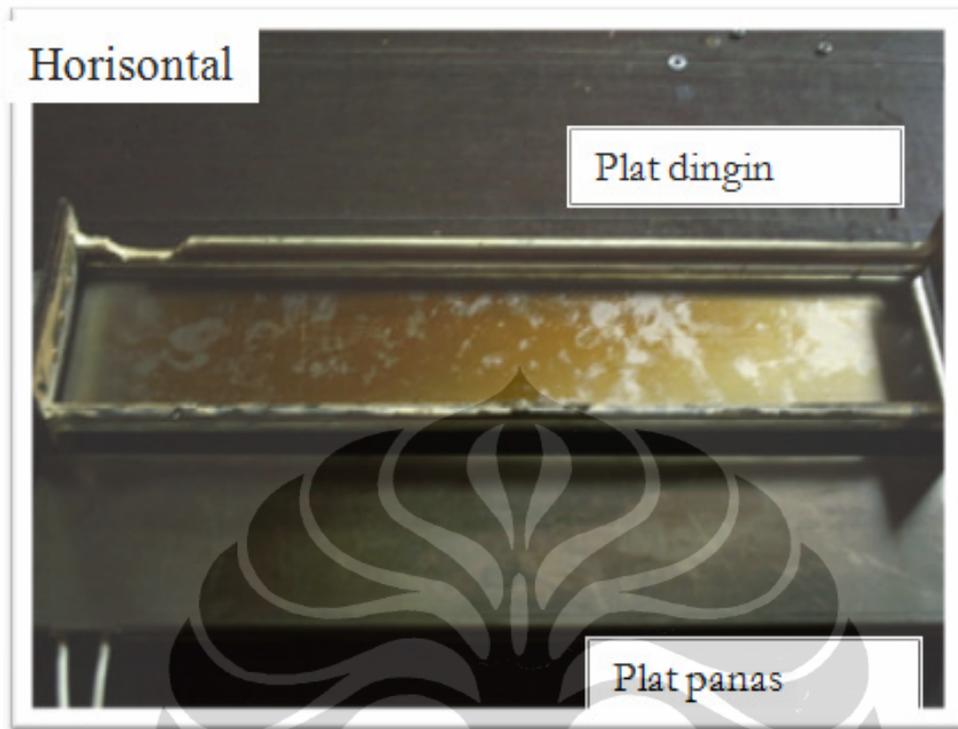
Bila dilihat secara keseluruhan data penurunan jumlah partikel, maka posisi plat panas di atas memiliki sedikit efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan plat panas di bawah. Ada dua kemungkinan yang mempengaruhi perbedaan ini, yaitu yang pertama adalah gaya gravitasi, pada saat posisi plat panas berada di atas, maka arah pergerakan partikel akan ke bawah, bila partikel tersebut teraglomerasi, maka akan ada pengaruh gaya gravitasi. Yang kedua adalah pengaruh konveksi paksa dan alamiah, pada saat posisi plat panas berada di bawah, maka pergerakan partikel ke atas akan terhambat oleh *buoyancy force* dan kecepatan aliran udara-partikel. Walaupun demikian pengaruhnya sangat kecil,

artinya tidak ada perbedaan yang signifikan antara posisi plat panas di atas maupun plat panas di bawah.

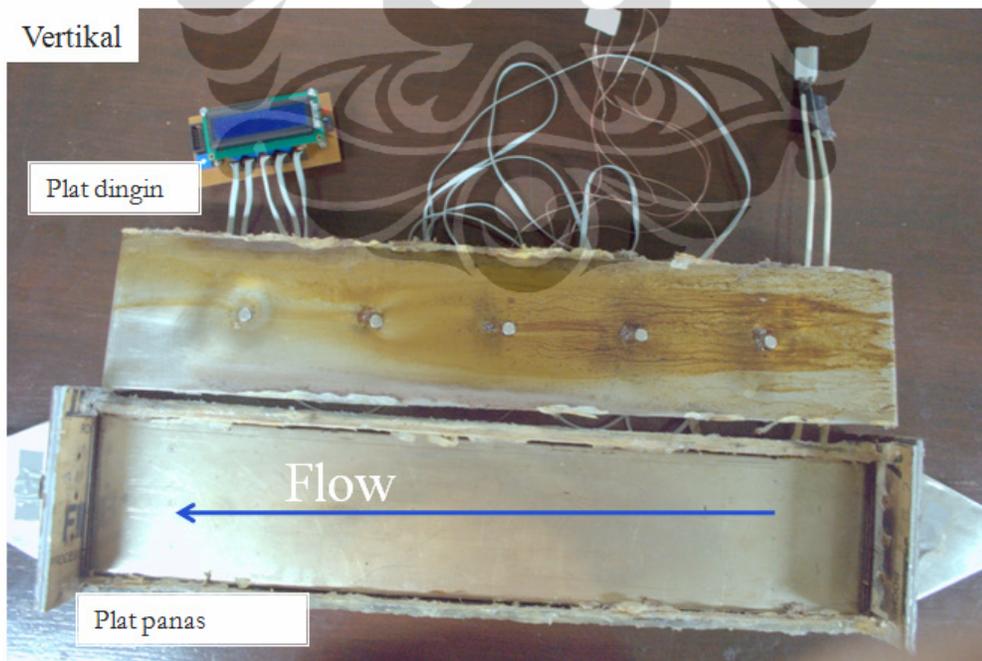


Gambar 4.10. Grafik perbandingan jumlah partikel per million (ppm) untuk plat panas di bawah.

Data hasil pengamatan secara visual, peneliti hanya menampilkan photophotonya. Photo tersebut dapat dilihat pada **Gambar 4.11**. Dari gambar tersebut terlihat bahwa deposit yang terdapat pada sisi masuk plat dingin lebih pekat. Kemudian berkurang sampai pada sisi keluar. Begitu juga pengamatan secara visual pada plat vertikal. Photonya dapat dilihat pada **Gambar 4.12**. Bahkan deposit sangat tipis sekali pada sisi keluarnya. Sebagai perbandingan, peneliti menampilkan hasil penelitian yang dilakukan oleh A. Messere [2003]. A. Messere melakukan percobaan dengan menggunakan *aerosol smoke* jenis *diesel smoke* dengan ukuran partikel $0,034 - 0,3 \mu\text{m}$. Jarak antar plat panas dan dingin sebesar 4 mm dan panjang plat 200 mm. Gambar detailnya dapat dilihat pada **Gambar 4.13**.



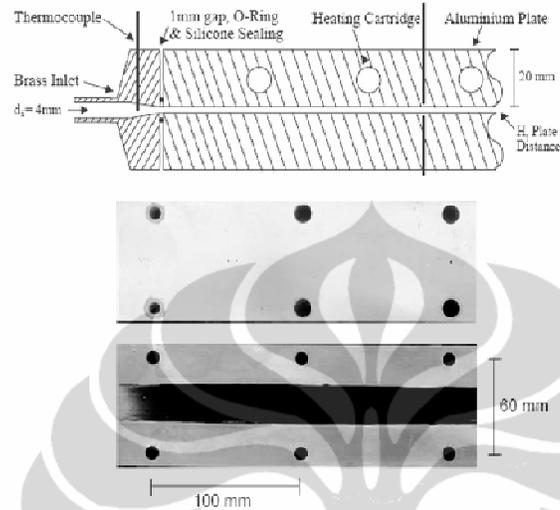
Gambar 4.11. Photo pengamatan secara visual plat horisontal



Gambar 4.12. Photo pengamatan secara visual plat vertikal

A. Messere, et.al, Journal of Aerosol Science 2003

1. *Thermophoretic deposition of soot aerosol particles under experimental conditions relevant for modern diesel engine exhaust gas systems.*
2. Particle size range of 3-1 – 300 nm (0.03-1 – 0.3 μm).



Gambar 4.13. Photo pengamatan secara visual oleh A. Messere

Seperti yang terlihat pada **Gambar 4.13.**, A. Messere (2003) melakukan pengujian terhadap deposit yang terjadi di saluran gas buang kendaraan bermotor diesel. Pada pengujian ini beliau menggunakan 2 (dua) buah plat datar, yaitu plat panas dengan menggunakan aluminium dan plat dingin menggunakan *stainless steel*. Secara visual terlihat bahwa tidak terjadi deposit pada plat panas, sebaliknya deposit sangat pekat terjadi pada plat dingin. Dengan demikian gaya *thermophoresis* memegang peranan penting terjadinya deposit tersebut.

4.3. HASIL SIMULASI FENOMENA THERMOPHORESIS

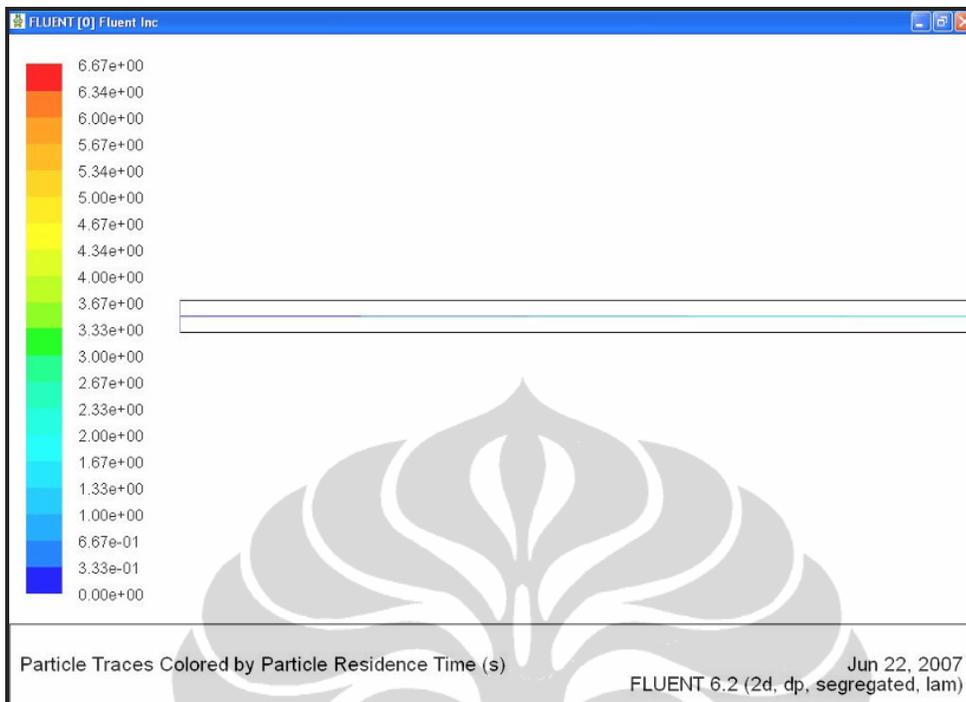
Pada dasarnya penelitian fenomena *thermophoresis* dengan simulasi ini hanya untuk mengklarifikasi parameter-parameter yang sulit dilakukan pada eksperimen selain *thermophoretic force*. Parameter tersebut adalah *electrostatic force*, *buoyancy force*, *saffman lift force*, *gravitational force*, dan *brownion motion*. Dengan simulasi maka parameter-parameter tersebut dengan mudah dimasukkan sebagai *variable*, dan parameter tersebut tersedia dalam aplikasi software FLUENT.

Untuk menganalisa pengaruh gaya *thermophoresis* dan gaya lainnya terhadap pergerakan partikel, data hasil simulasi dikonversikan menjadi bentuk grafik perbandingan antara jarak dan perbedaan temperatur. Kecepatan partikel dibuat 3 variasi yaitu : 0,01 m/s; 0,05 m/s dan 0,1 m/s. Jarak antara plat panas dan dingin adalah 5 mm.

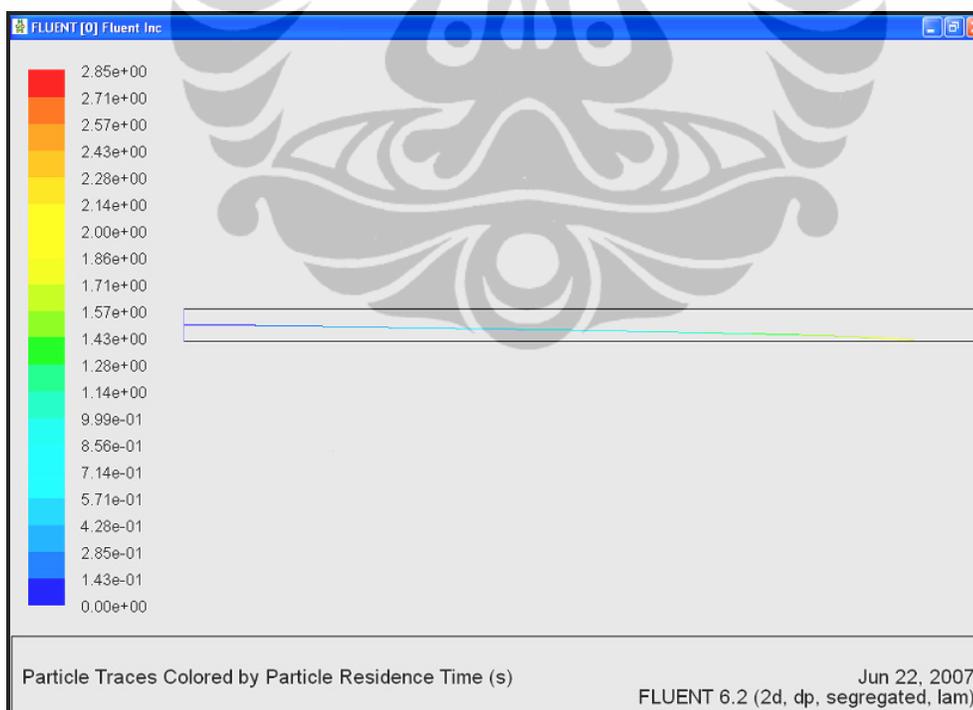
Dari daftar pustaka [26, 27] disebutkan bahwa *electrostatic force* akan mempunyai pengaruh yang besar pada tegangan di atas 10.000 V. Partikel yang dipengaruhi oleh gaya ini juga berkisar 50 – 100 μm . Makanya aplikasi *electrostatic force* banyak dipakai di sistem pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar batubara sebagai *Electrostatic Precipitator (EP)*. *Buoyancy force* dan *gravitational force* sudah dijelaskan sebelumnya. Dari hasil perhitungan *thermal boundary layer* bisa dilihat bagaimana pengaruh gaya tersebut.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, maka dalam simulasi ini hanya akan dilihat pengaruh dari gaya angkat Saffman (*saffman lift force*) dan pergerakan *Brownian (brownion motion)*. Simulasi dilakukan dua kali yaitu : yang pertama mengaktifkan gaya *thermophoresis* murni dan yang kedua adalah mengaktifkan gaya *thermophoresis* disertai gaya angkat Saffman dan pergerakan Brownian.

Simulasi diawali dengan perbedaan temperatur ($\Delta T = 0 \text{ K}$), kemudian dilihat pergerakan partikelnya. Hasilnya dapat dilihat pada **Gambar 4.14**. Ini dilakukan untuk memastikan tidak ada kesalahan dalam input data. Setelah itu juga dilakukan simulasi awal untuk $\Delta T = 200 \text{ K}$. Hasilnya dapat dilihat pada **Gambar 4.15**.



Gambar 4.14. Pergerakan partikel pada $\Delta T = 0$ K, plat panas di atas



Gambar 4.15. Pergerakan partikel pada $\Delta T = 200$ K, plat panas di atas

Bila dilihat pada **Gambar 4.16.** dan **Tabel 4.9.**, hasil simulasi gaya *thermophoresis* murni (tanpa gaya angkat *Saffman* dan pergerakan *Brownian*), untuk jarak plat 5mm menunjukkan jarak maksimal yang ditempuh oleh partikel adalah 764,9 mm pada kondisi beda temperatur 50 K dan kecepatan udara 0,1 m/s. Pada kondisi yang sama tetapi dengan mengaktifkan gaya angkat *Saffman* dan pergerakan *Brownian* akan menghasilkan jarak tempuh maksimum 747,3 mm.

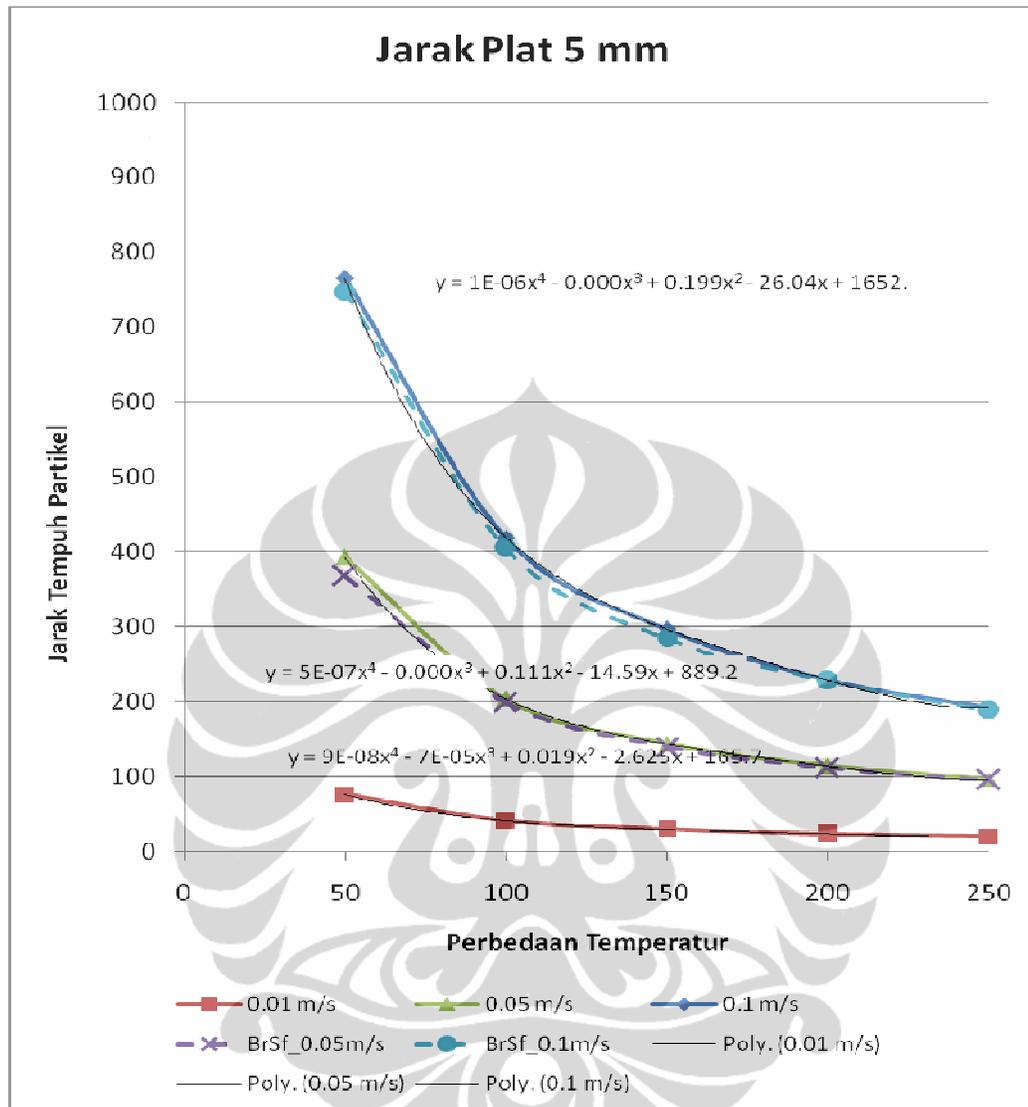
Sedangkan jarak terendah untuk gaya *thermophoresis* murni adalah 19,6 mm pada kondisi beda temperatur 250 K dan kecepatan udara 0,01 m/s. Dengan mengaktifkan pengaruh gaya angkat *Saffman* dan pergerakan *Brownian* akan menghasilkan jarak 0 mm. Hal tersebut disebabkan oleh kecilnya kecepatan udara yang menyebabkan pergerakan partikel langsung mengarah ke plat dingin pada inlet.

Tabel 4.9. Data Simulasi Jarak antar Plat 5 mm

Kecepatan Udara (m/s)	Beda Temperatur (K)	Jarak Tempuh 1 (TF)		Jarak Tempuh 2 (TF+Br+Sf)	
		Plat Dingin di atas (mm)	Plat Dingin di bawah (mm)	Plat Dingin di atas (mm)	Plat Dingin di bawah (mm)
0.01	50	75.9	75.62		
	100	40.89	40.67		
	150	29.15	28.99		
	200	23.2	22.78		
	250	19.62	19.29		
0.05	50	392.83	392.7	367.5	368.24
	100	203.79	203.445	198.57	198.1
	150	143.64	143.44	139.56	140.7
	200	113.86	108.88	111.08	111.08
	250	95.86	92.36	94.92	93.66
0.1	50	764.87	765.15	747.33	739.72
	100	419	411.35	405.32	401.93
	150	297.05	291.94	283.96	287.2
	200	228.8	230.82	227.81	226.09
	250	192.08	191.1	188.21	190.45

Keterangan tabel :

- TF = Gaya *Thermophoresis*
- TF+Br+Sf = Gaya *Thermophoresis* + Gerak *Brownian* + Gaya *Saffman*

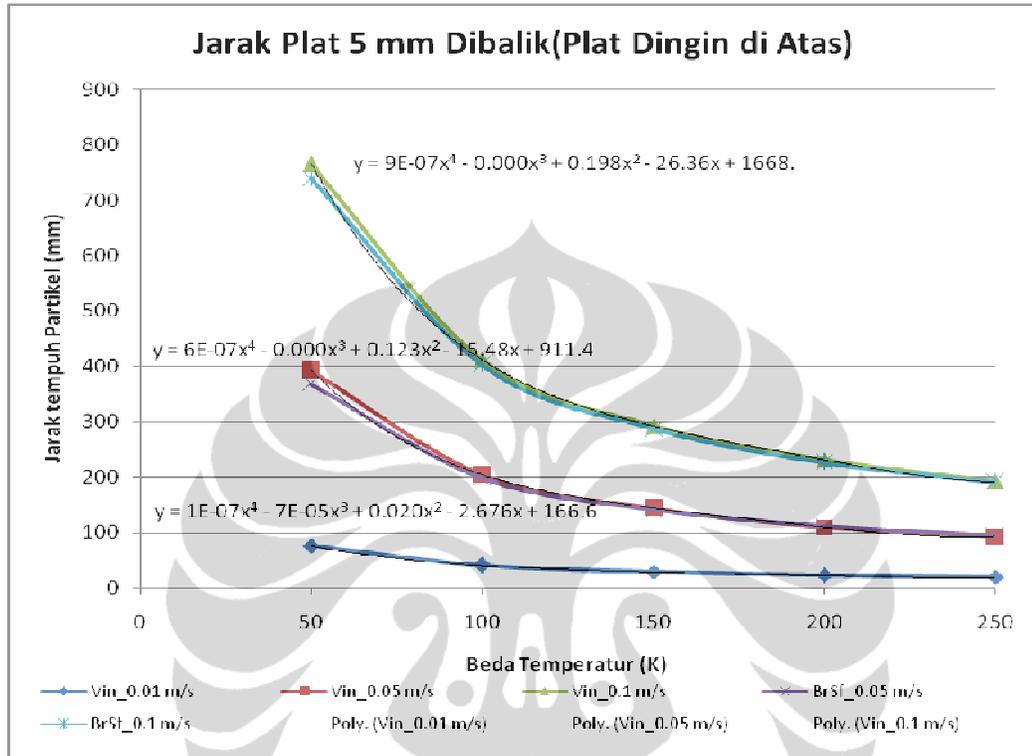


Gambar 4.16. Grafik simulasi *thermophoresis* plat panas di atas

Ada dua hal menarik bila melihat **Gambar 4.16.**, yang pertama adalah kecil sekali pengaruh *saffman lift force* dan *brownion motion*, artinya pergerakan partikel itu sangat dominan disebabkan oleh *thermophoretic force*. Yang kedua adalah pengaruh kecepatan partikel/udara. Semakin kecil kecepatan udara, maka jarak tempuh akan semakin pendek, artinya pengaruh *thermophoretic force* sangat besar.

Bagaimana bila posisi plat panas berada di bawah ? Bila melihat data simulasi pada **Tabel 4.9.**, maka bisa digarisbawahi bahwa perubahan posisi plat panas baik di atas maupun di bawah tidak memberikan dampak yang signifikan

terhadap *thermophoretic force*. Grafik pergerakan partikel hasil simulasi pada posisi plat panas di bawah dapat dilihat pada **Gambar 4.17**.



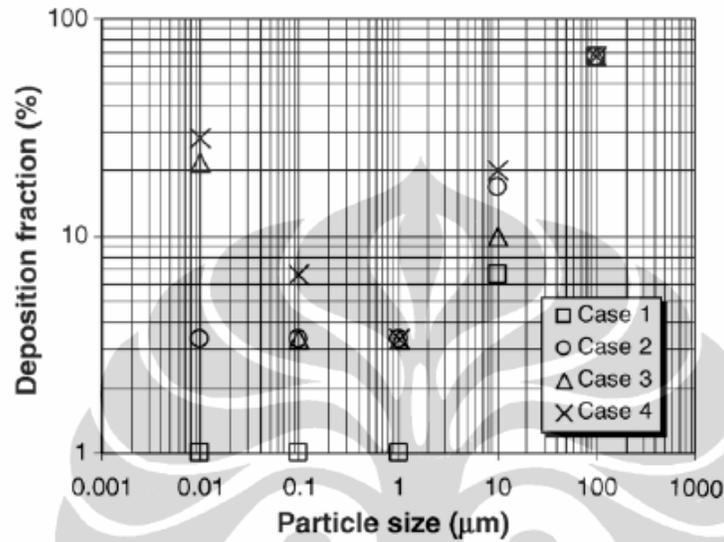
Gambar 4.17. Grafik simulasi *thermophoresis* plat panas di bawah

Peneliti mencoba membandingkan dengan hasil penelitian oleh Iman Zahmatkesh [2008]. Iman Z. menyimpulkan bahwa *brownian motion* hanya berpengaruh untuk partikel-partikel yang berukuran lebih kecil dari 0,01 μm . *Thermophoretic force* akan sangat berpengaruh untuk partikel berukuran 0,1 μm – 10 μm . Sedangkan partikel yang berukuran lebih besar dari 100 μm , maka gaya yang sangat berpengaruh adalah *inertial impaction*. Detail hasil penelitian Iman Z. dapat dilihat pada **Gambar 4.18. (a)** dan **(b)**.

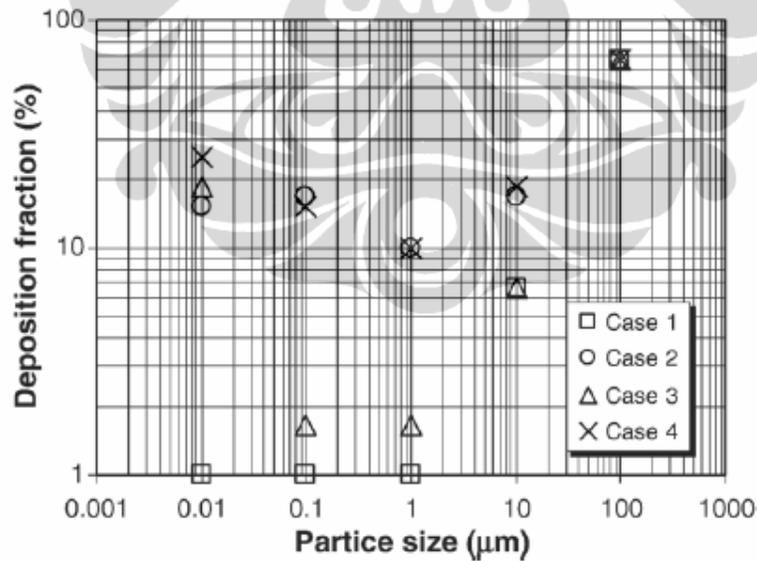
Hasil yang serupa juga diteliti oleh M.K. Akbar, untuk ukuran partikel 1 μm , 200 nm, dan 50 nm, terjadinya deposit didominasi oleh faktor *thermophoresis*. Sangat kecil pengaruh dari gaya *brownian*, gaya angkat, gaya gravitasi, maupun gaya-gaya yang lain.

Different cases concerned for the analysis of particle dispersion and deposition

Case no.	Thermophoresis	Brownian diffusion	Saffman lift force	Stokes drag
Case 1	No	No	Yes	Yes
Case 2	Yes	No	Yes	Yes
Case 3	No	Yes	Yes	Yes
Case 4	Yes	Yes	Yes	Yes



(a) Perbedaan temperatur, $\Delta T = 350 \text{ K}$



(b) Perbedaan temperatur, $\Delta T = 400 \text{ K}$

Gambar 4.18. Hasil Penelitian Iman Zahmatkesh [2008]

4.4. PENGEMBANGAN THERMAL PRECIPITATOR

Setelah mendapatkan data-data yang lebih akurat mengenai fenomena *thermophoresis*, langkah selanjutnya adalah mengaplikasikan *thermophoresis phenomenon* ini dalam kehidupan sehari-hari khususnya dalam pengendalian pencemaran udara atau dalam bidang yang disebut dengan *Indoor Air Quality* (IAQ). M.A. Gallis [2004] dalam penelitiannya tentang *thermophoresis* menyebutkan bahwa *thermophoresis* memiliki aplikasi yang sangat luas seperti :

- *Aerosol thermal precipitator*
- *Aerosol manufacture of fiber optics*
- ***Gas cleaning***
- *Nuclear reactor safety*
- *Semiconductor processing*
- *The protection of valuable surface from particle contaminant deposition*

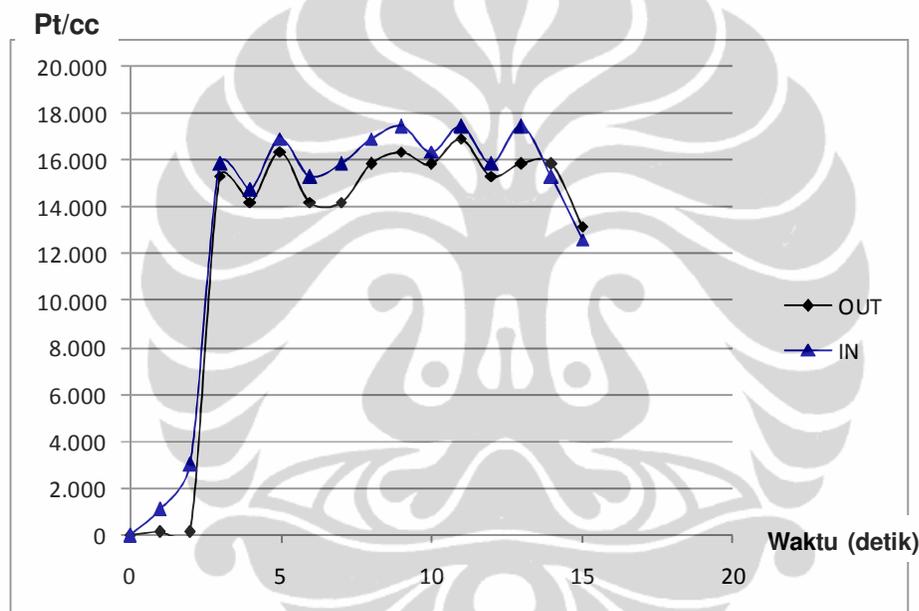
Mengacu kepada hasil penelitian dan literatur tersebut, peneliti mengembangkan *aerosol thermal precipitator* yang berfungsi sebagai *gas cleaning*. Alat uji menggunakan plat horisontal, sama seperti pada pengujian sebelumnya. *Aerosol smoke* yang digunakan juga sama, yaitu dari *jenis tobacco smoke* dengan spesifikasi seperti yang terlihat pada **Tabel 3.1**. Metode pengukurannya yang dikembangkan dengan metode yang lebih akurat dan presisi yaitu dengan menggunakan *particle counter*. Spesifikasi *particle counter* dan kalibrasi dari gas sensor ke *particle counter* sudah dijelaskan pada subbab **3.4.1**.

Data hasil pengujian *aerosol thermal precipitator* ini dapat dilihat pada **Tabel 4.10**. dan **Gambar 4.19. – 4.23**.

Tabel 4.10. Jumlah partikel yang terdeposit

ΔT	0		5		10		15		20	
Thot	25		30		35		40		45	
Tcold	25		25		25		25		25	
T*	0,00		0,17		0,29		0,38		0,44	
	IN (pt/cc)	OUT (pt/cc)								
	14.160,99	13.328,08	15.536,47	6.524,99	15.954,46	6.974,51	16.092,46	6.795,21	16.922,06	13.084,78
Deposited Particle	832		9011		8979		9297		3837	

Gambar 4.19. menunjukkan grafik hasil pengujian untuk $\Delta T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ atau $T^* = 0$ dimana pemanas/heater tidak digunakan, jadi semua dalam kondisi temperatur lingkungan. Jumlah rata-rata partikel pada sisi masuk adalah 14.160,99 pt/cc dan pada sisi keluar adalah 13.328,08 pt/cc, selisih rata-rata adalah 832 pt/cc. Bila dilihat jumlah partikel yang terdeposit, sangat kecil sekali jumlah bahkan bisa diabaikan, maka dapat disimpulkan bahwa *thermophoresis* merupakan *driving force* terjadinya deposit atau boleh dikatakan *thermal precipitator* sangat mungkin digunakan untuk pengumpul partikel *smoke*.



Gambar 4.19. Partikel yang terdeposit pada $T^*=0$

Grafik pada **Gambar 4.20.** menunjukkan jumlah partikel saat masuk dan keluar dari *test section* untuk perbedaan temperatur antara plat panas dan dingin sebesar $5 \text{ }^\circ\text{C}$ atau $T^*=0,17$. Pada 5 detik pertama belum terlihat peran dari *thermophoresis*. Namun saat memasuki detik ke-5 dan seterusnya terjadi perbedaan jumlah partikel yang sangat signifikan. Jumlah rata-rata partikel pada sisi masuk adalah 15.536,47 pt/cc dan pada sisi keluar adalah 6.524,99 pt/cc, sehingga selisih rata-rata adalah 9.011 pt/cc. Jumlah inilah yang terdeposit/menempel pada sisi dingin *test section*. Hasil ini hampir tidak ada bedanya bila plat dingin di tempatkan di bagian atas. Artinya pengaruh gravitasi

terhadap partikel tidak ada. Bagaimana pengaruh dari *buoyancy force*, gaya angkat *Saffman* (*lift force*), *Brownian motion*, dan *electrostatic force*.

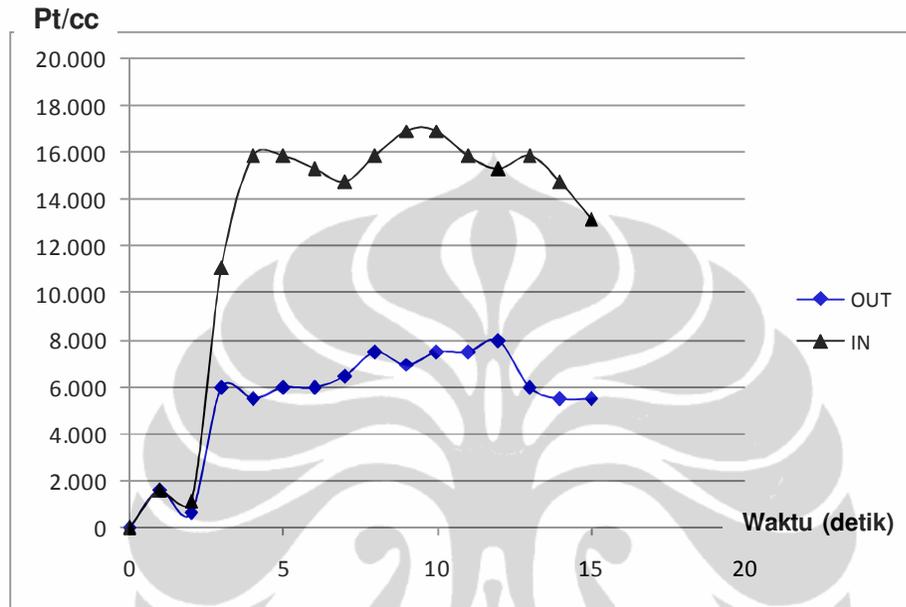
Buoyancy force timbul karena adanya perbedaan viskositas pada suatu fluida. Pada fluida yang berbentuk gas, viskositas akan menurun seiring dengan peningkatan temperatur. Pengaruh *buoyancy force* pada suatu partikel dalam suatu fluida dapat diketahui dari mekanisme perpindahan panas yang dialami fluida tersebut. *Buoyancy force* hanya muncul pada konveksi yang terjadi secara alamiah. Untuk menentukan jenis konveksi yang terjadi dapat ditentukan dari perbandingan nilai Grashoff dan nilai Reynolds kuadrat (Gr/Re^2) fluida tersebut. Pada eksperimen ini perbandingan nilai Grashoff dan Reynolds kuadrat mendekati angka 1, sehingga *buoyancy force* kecil pengaruhnya.

Gaya angkat Saffman adalah gaya angkat pada suatu partikel yang disebabkan oleh adanya gesekan antara partikel dengan aliran fluida. Dikarenakan diameter partikel yang sangat kecil maka ketika ada aliran fluida yang mengenai partikel, partikel tersebut akan terangkat dan terbawa oleh udara dan melawan gaya gravitasi. Pada eksperimen ini kecepatan udara/partikel sangat rendah yaitu 5 cm/detik, jadi gaya angkat Saffman ini bisa diabaikan dan walaupun ada sangat kecil sekali.

Sedangkan untuk *Brownian motion*, gerak ini terjadi pada partikel yang berukuran submikron ($d < 0,01 \mu m$). Gerakan ini terjadi karena efek momentum antar partikel. Pergerakan *Brownian* adalah pergerakan acak (*random*) dari suatu partikel solid yang tersuspensi dalam suatu fluida. Pergerakan Brownian tersebut disebabkan oleh adanya ketidakseimbangan gaya yang dihasilkan dari pergerakan partikel-partikel fluida yang berukuran jauh lebih kecil dari partikel solid dan menumbuk partikel solid secara berulang-ulang. Dikarenakan dimensi partikel fluida yang sangat kecil, untuk dapat menghasilkan pergerakan Brownian maka dimensi partikel solid juga sangat kecil. Pergerakan Brownian berlaku untuk partikel sub-mikron dalam aliran laminar. Pada penelitian ini partikel yang digunakan adalah asap dengan ukuran lebih besar dari $0,01 \mu m$, sehingga pengaruh *Brownian motion* ini dapat diabaikan.

Pengaruh gaya elektrostatis tidak ada karena gaya ini terjadi karena adanya perbedaan muatan antar partikel. Gaya ini terjadi pada suatu partikel jika partikel

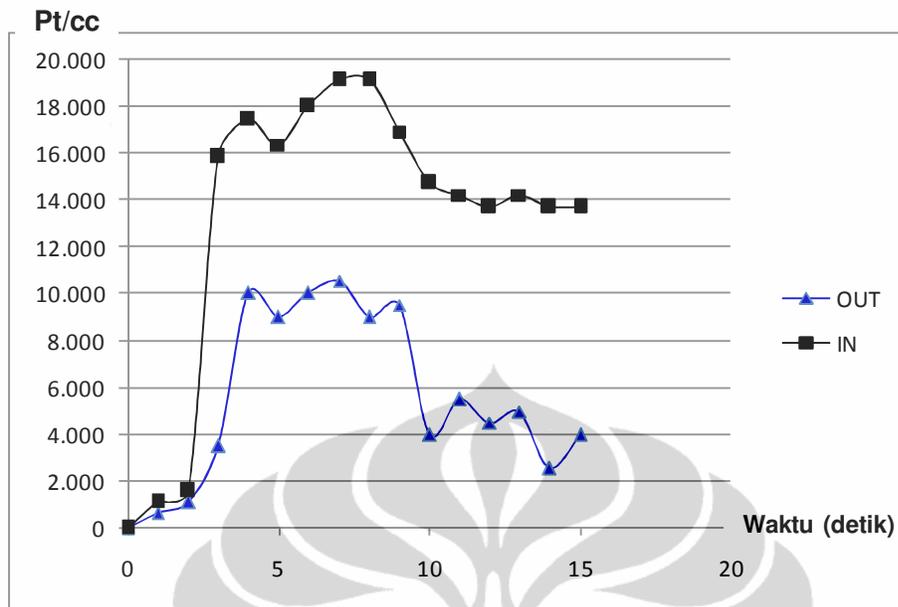
tersebut berada pada suatu medan listrik yang memiliki beda tegangan sebesar $E = 10^4$ V. Dan berdasarkan hasil penelitian Changfu You et.all [2010] bahwa gaya elektrostatik akan efektif dan berpengaruh besar untuk ukuran partikel di atas 10 μm . Sedangkan partikel *smoke* hanya berukuran sampai dengan 2,5 μm .



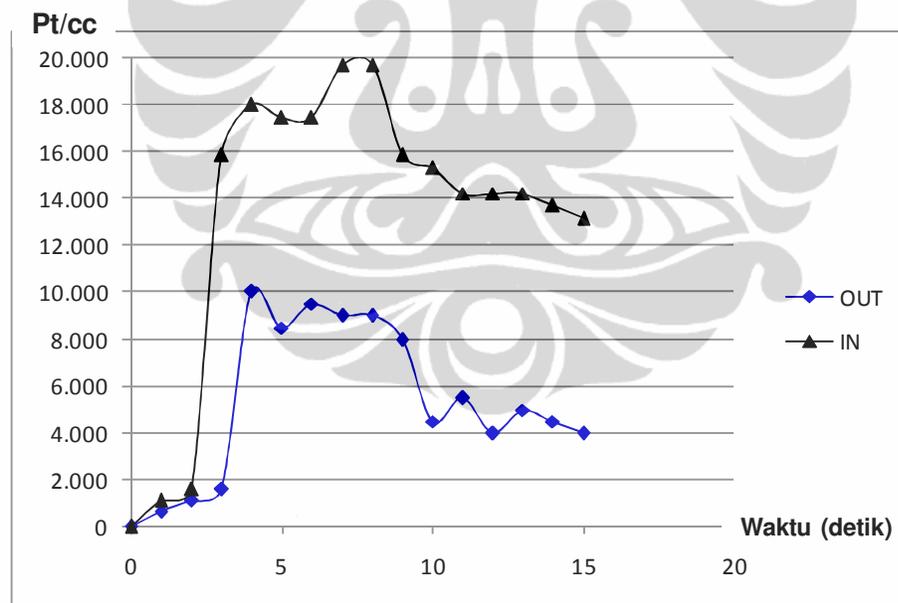
Gambar 4.20. Partikel yang terdeposit pada $T^*=0,17$ atau $\Delta T = 5$ °C

Grafik pada **Gambar 4.21.** menunjukkan jumlah partikel saat masuk dan keluar dari *test section* untuk perbedaan temperatur antara plat panas dan dingin sebesar 10 °C atau $T^* = 0,29$. Pada 3 detik pertama belum terlihat peran dari *thermophoresis*. Namun saat memasuki detik ke-5 dan seterusnya terjadi perbedaan jumlah partikel yang sangat signifikan. Jumlah rata-rata partikel pada sisi masuk adalah 15.954,46 pt/cc dan pada sisi keluar adalah 6.974,51 pt/cc, selisih rata-rata adalah 8.979 pt/cc.

Hal yang serupa juga pada grafik **Gambar 4.22.**, dimana perbedaan temperatur antara plat panas dan plat dingin 15 °C atau $T^* = 0,38$, pengaruh *thermophoresis* baru terlihat pada detik ke 3. Hal ini memang terjadi karena jarak antara *test section* dan *inlet section* sebesar 15 cm, sedangkan kecepatan udara 5 cm/detik. Jumlah rata-rata partikel pada sisi masuk adalah 16.092,46 pt/cc dan pada sisi keluar adalah 6.795,21 pt/cc, selisih rata-rata adalah 9.297 pt/cc.



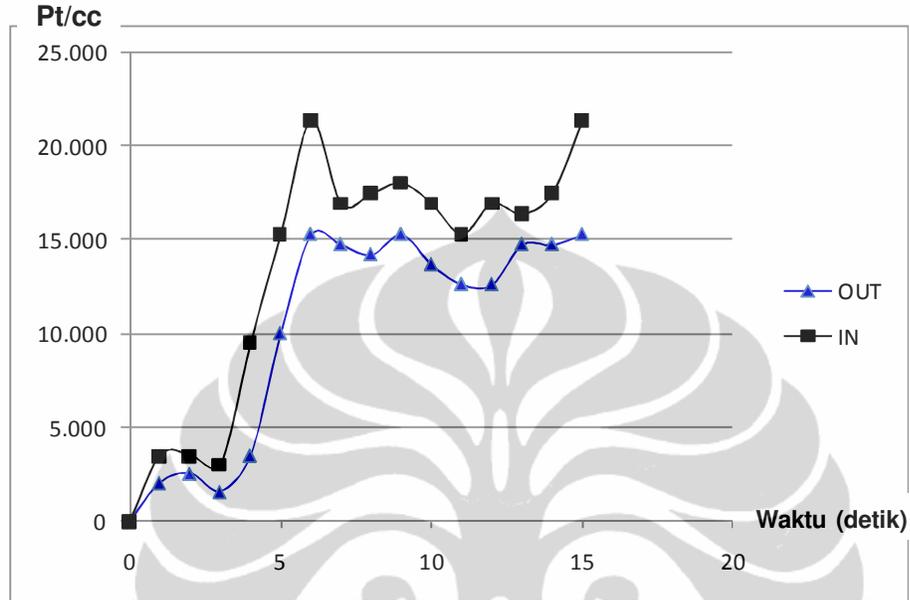
Gambar 4.21. Partikel yang terdeposit pada $T^*=0,29$ atau $\Delta T = 10^\circ\text{C}$



Gambar 4.22. Partikel yang terdeposit pada $T^*=0,38$ atau $\Delta T = 15^\circ\text{C}$

Bila melihat selisih rata-rata partikel, maka untuk $\Delta T 5^\circ\text{C}$, 10°C , dan 15°C cenderung memiliki kemampuan gaya *thermophoresis* yang hampir sama. Jumlah partikel yang terdeposit rata-rata 9.000 pt/cc. Sedangkan partikel yang terdeteksi di *outlet section* rata-rata 6.500 pt/cc. Bila mengacu kepada standard ruang udara

bersih (*cleanroom standards*) ISO 14644-1 FED STD 209E, untuk ΔT 15 °C alat ini belum memenuhi standar.



Gambar 4.23. Partikel yang terdeposit pada $T^*=0,44$ atau $\Delta T = 20$ °C

Hal yang agak janggal terjadi pada $\Delta T=20$ °C atau $T^*=0,44$. Seperti terlihat pada **Tabel 4.10.** dan grafik pada **Gambar 4.23.**, jumlah rata-rata partikel pada sisi masuk adalah 16.922,06 pt/cc dan pada sisi keluar adalah 13.084,78 pt/cc, selisih rata-rata adalah 3.837 pt/cc. Hal ini terjadi karena adanya pengaruh konveksi yang diberikan oleh plat panas, sehingga *thermal boundary layer* yang terbentuk lebih besar dari jarak antara kedua buah plat (yaitu 5 mm).

4.5. PENGARUH RADIASI TERHADAP THERMOPHORESIS

Kalor (*energy*) dapat berpindah melalui daerah-daerah hampa. Mekanisme ini disebut dengan sinaran atau radiasi elektromagnetik. Radiasi termal adalah radiasi elektromagnetik yang dipancarkan oleh suatu benda karena temperaturnya. Sedangkan fenomena *thermophoresis* terjadi karena adanya perbedaan temperatur. Oleh karena itu pada penelitian *thermophoresis* ini, dimana besar partikel dibatasi 0,01 μm – 5 μm , akan dilihat seberapa besar pengaruh radiasi terhadap pergerakan partikel tersebut.

Energi yang diradiasikan (E_{rad}) oleh suatu permukaan plat datar yang berukuran 0,15 m x 0,5 m dapat dituliskan pada persamaan :

$$E_{rad} = \varepsilon F_{12} A \sigma (T_1^4 - T_2^4) \dots\dots\dots (4.01)$$

- ε : emisivitas bahan (*stainless steel*) = 0,57
- A : luas penampang = 0,075 m²
- σ : Konstanta Stefan-Boltzmann = 5,669 x 10⁻⁸ W/m².K⁴
- F₁₂ : Faktor pandang = 1 (refer to gambar 8-12 JP. Holman)
- : Temperatur permukaan [K], T₁ = 323 K, T₂ = 303 K

$$E_{rad} = 0,57 \cdot 1 \cdot 0,0075 \cdot 5,669 \times 10^{-8} \cdot (323^4 - 303^4)$$

$$E_{rad} = 5,951 \text{ W}$$

Perambatan radiasi termal berlangsung dalam bentuk kuantum-kuantum yang diskrit, dimana setiap kuantum mengandung energi sebesar :

$$E_{kuantum} = \frac{dN}{dt} h \cdot f \dots\dots\dots (4.2)$$

- dN/dt : jumlah foton yang terpancar per satuan waktu
- h : konstanta Planck = 6,625x10⁻³⁴ J.s
- f : frekwensi = c/ λ
- c : kecepatan cahaya = 3x10⁸ m/s
- λ : panjang gelombang = 10⁻⁶ m

Maka $E_{rad} = E_{kuantum}$, dengan demikian jumlah foton yang terpancar per satuan waktu (dN/dt) dapat dihitung sebagai berikut :

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{10^{-6}} = 3 \times 10^{14}$$

$$E_{kuantum} = E_{rad}$$

$$5,951 = \frac{dN}{dt} \cdot 6,625 \times 10^{-34} \cdot 3 \times 10^{14}$$

$$\frac{dN}{dt} = 2,994 \times 10^{19}$$

Gambaran fisis yang umum tentang perambatan radiasi dapat diperoleh dengan menganggap setiap kuantum sebagai suatu partikel yang mempunyai energi, massa, dan momentum, seperti halnya molekul gas. Jadi, pada hakekatnya, radiasi dapat digambarkan sebagai “gas foton” yang dapat mengalir dari satu tempat ke tempat yang lain. Maka jumlah foton yang menumbuk partikel per satuan waktu (n) dapat dirumuskan :

$$n = \frac{\pi^2}{A} \frac{dN}{dt}$$

$$r \quad : \text{jari-jari partikel} = 0,25 \mu\text{m}$$

$$A \quad : \text{luas plat} = 0,075 \text{ m}^2$$

$$n = \frac{\pi^2}{A} \frac{dN}{dt} = 7,835 \times 10^6 \text{ detik}^{-1}$$

Bila jumlah foton yang diserap partikel per satuan waktu sebesar n^* , maka dapat dirumuskan :

$$n^* = n \times \text{absorpsivitas partikel}$$

$$n^* = n$$

Diasumsikan absorpsivitas partikel maksimum yaitu sama dengan 1 (satu).

Dengan menggunakan hubungan relativistik antara massa dan energi, maka dapat diturunkan persamaan gaya radiasi yang didapat dari momentumnya, yaitu :

$$F_{rad} = n^* \cdot \text{momentum} = n^* \frac{h \cdot f}{c} \quad \dots \dots \dots (4.3)$$

$$F_{rad} = 7,835 \times 10^6 \cdot \frac{6,625 \times 10^{-34} \cdot 3 \times 10^{14}}{3 \times 10^8}$$

$$F_{rad} = 5,129 \times 10^{-20} \text{ N}$$

Bila melihat gaya radiasi (F_{rad}) hanya sebesar $5,129 \times 10^{-20}$ N, maka dapat disimpulkan bahwa pengaruh radiasi terhadap gaya *thermophoretic* sangat kecil dan bisa diabaikan.



BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

KESIMPULAN

Penelitian fenomena *thermophoresis* pada permukaan perpindahan kalor dan aplikasinya dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut yaitu :

- *Thermophoresis* memegang peranan penting atau boleh dikatakan sebagai *driving force* terjadinya deposit pada *aerosol smoke* yang berukuran 0,01- 5 μm .
- Gaya-gaya lain yang mempengaruhi pergerakan partikel seperti *buoyancy force*, *saffman lift force*, *electrostatic force*, *gravitational force*, dan *brownian motion* sangat kecil sekali pengaruhnya terhadap deposit *aerosol smoke* yang berukuran 0,01- 5 μm .
- *Thermal precipitator* dapat dijadikan sebagai salah satu alternatif untuk *smoke collector* atau sebagai pengendali pencemaran udara. Partikel yang dijadikan sampel adalah *tobacco smoke* yang memiliki kisaran diameter 0,01 – 1 μm . Jumlah rata-rata partikel yang masuk adalah 16.000 pt/cc dan yang keluar rata-rata 7.000 pt/cc, sehingga rata-rata yang terdeposit adalah 9.000 pt/cc atau fraksi deposit rata-rata 0,65.

SARAN

Bila melihat kisaran diameter partikel tipe *bioaerosol* seperti virus (0,01 μm – 0,2 μm), *bacteria* (0,2 μm – 10 μm) dan beberapa jenis jamur, maka *thermal precipitator* juga dapat digunakan untuk menangkap bioaerosol tersebut. Oleh karena itu, *thermal precipitator* perlu dikembangkan sebagai alat alternatif untuk meningkatkan kebersihan udara.

DAFTAR ACUAN

- [1] J. Tyndall, "On dust and disease", Proceeding of the Royal Institution of Great Britain 6, (1-14), 1870.
- [2] J. Aitken, "On the formation of small clear space in dusty air", Transactions of the Royal Society of Edinburgh (239-272), 1884.
- [3] Waldmann, L., and Schmitt, K. H., "Thermophoresis and Diffusiphoresis of Aerosol". In Davies, C.N. (Ed), Aerosol Science, pp. 137-162, London : Academic Press, 1966.
- [4] Goldsmith P, May FG, "Diffusiphoresis and Thermophoresis in Water Vapor System". In Davies, C.N. (Ed), Aerosol Science, pp. 163-194, London : Academic Press, 1966.
- [5] Derjaguin, B.V., Rabinovich, Ya. I., Storozhilova, A.I. & Scherbina, G.I., "Measurement of the coefficient of thermal slip of gases and the thermophoresis velocity of large size aerosol particles", Journal of Colloid Interface Science 57, 451-461, 1976.
- [6] Talbot, L., Cheng, R.K., Schefer, R.W. and Willis, D.R., "Thermophoresis of particles in a heated boundary layer". Journal of Fluid Mechanics 101, 737-758, 1980.
- [7] M. Epstein, Hauser GM, Henry RE., "Thermophoretic Deposition of Particles in Natural Convection Flow From a Vertical Plate", Trans. ASME, Vol. 107, 272-276, 1985.
- [8] Walker, K.L., Homsy, G.M. and Geyling, F.T., "Thermophoresis deposition of small particles in laminar tube flow", Journal of Colloid Interface Science 69, 138-147, 1979.
- [9] Bachelor, G.K. and Shen, C. "Thermophoresis deposition of particles in gas flowing over cold surfaces"., Journal of Colloid Interface Science 107, 21-37, 1985
- [10] C. He, G. Ahmadi, "Particle deposition with thermophoresis in laminar and turbulent flows", Aerosol Science and Technology 29, 525-546, 1998.
- [11] Nishio, G., Kitani, S., & Takahashi, K., "Thermophoretic deposition of aerosol particles in a heat exchanger pipe", Industrial and Engineering Chemistry Process Design Development, 13 (4), (408-815), 1974.
- [12] Byers, R.L., & Calvert, S., "Particle deposition from turbulence streams by means of thermal force", Industrial and Engineering Chemistry, Fundamentals, 8 (4), (646-655), 1969.
- [13] Romay, F.J., Takagaki, S.S., Pui, D.Y.H., & Liu, B.Y.H., "Thermophoretic deposition of aerosol particles in turbulent pipe flow", Journal of Aerosol Science, 29, (943-959), 1998.
- [14] Stanford Research Institute Journal, "Characteristics of Particles and Particle Dispersoids", Thirrd Quarter, California, 1961.

- [15] Stratmann, F., Fissan, H., "Experimental and theoretical study of submicron particle transport in cooled laminar tube flow due to combined convection, diffusion, and thermophoresis", *Journal of Aerosol Science*, 20, (899-902), 1989.
- [16] Montassier, N., Bouland, D., and Renoux, A., "Experimental study of thermophoretic deposition of particles in laminar tube flow", *Proceedings of the third international aerosol conference*, (pp. 395-398). Kyoto, Japan. 1990.
- [17] A. Messerer, R. Niessner, U. Poschl, "Thermophoretic deposition of soot aerosol particles under experimental conditions relevant for modern diesel engine exhaust gas systems, *Journal of Aerosols Science*, 34 (1009-1021), 2003.
- [18] Byung Uk Lee, Du Sub Byun, Gwi-Nam Bae, Jin-Ha Lee, "Thermophoretic deposition of ultrafine particles in turbulence pipe flow : Simulation of ultrafine particle behaviour in automobile exhaust pipe", *Journal of Aerosols Science*, 37 (1788-1796), 2006.
- [19] Zhou Tao et.al, "Visual experiment research of the inhaled particle thermophoresis deposition rule in the rectangle turbulence flow tube", *Journal of Applied Thermal Engineering*, 29 (1138-1145), 2009.
- [20] Gallis M.A., Rader D.J., Torczynski J.R., *A Generalized Approximation for the Thermophoretic Force on a Free Molecular Particle*, *Journal of Aerosols Science and Technology*, 38 (692-706), 2004.
- [21] David Gonzalez, Albert G. Nasibulin, Anatoli M. Baklanov, Sergei D., et.al., *A New Thermophoretic Precipitator for Collection of Nanometer-Sized Aerosol Particles*, *Journal of Aerosols Science and Technology*, 39 (1064-1071), 2005.
- [22] K.K. Dinesh , S. Jayaraj, "Augmentation of thermophoretic deposition in natural convection flow through a parallel plate channel with heat sources", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 36 (931-935), 2009.
- [23] Adrian Postelnicu, "Effect of thermophoresis particle deposition in free convection boundary layer from a horizontal flat plate embedded in a porous medium", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50 (2981-2985), 2007.
- [24] Brock JR, "On the Theory of Thermal Forces Acting on Aerosol Particle", *Journal of Colloid Sci* 17:768-770, 1962
- [25] D.P. Healy, J.B. Young, "An experimental and theoretical study of particle deposition due to thermophoresis and turbulence in an annular flow", *International Journal of Multiphase Flow* 36 (870-881), 2010.
- [26] Chi-Chang Wang, "Combined effects of inertia and thermophoresis on particle deposition onto a wafer with wavy surface", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49 (1395-1402), 2006.
- [27] Iman Zahmatkesh, "On the importance of thermophoresis and Brownian diffusion for the deposition of micro and nanoparticles", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 35 (369-375), 2008.

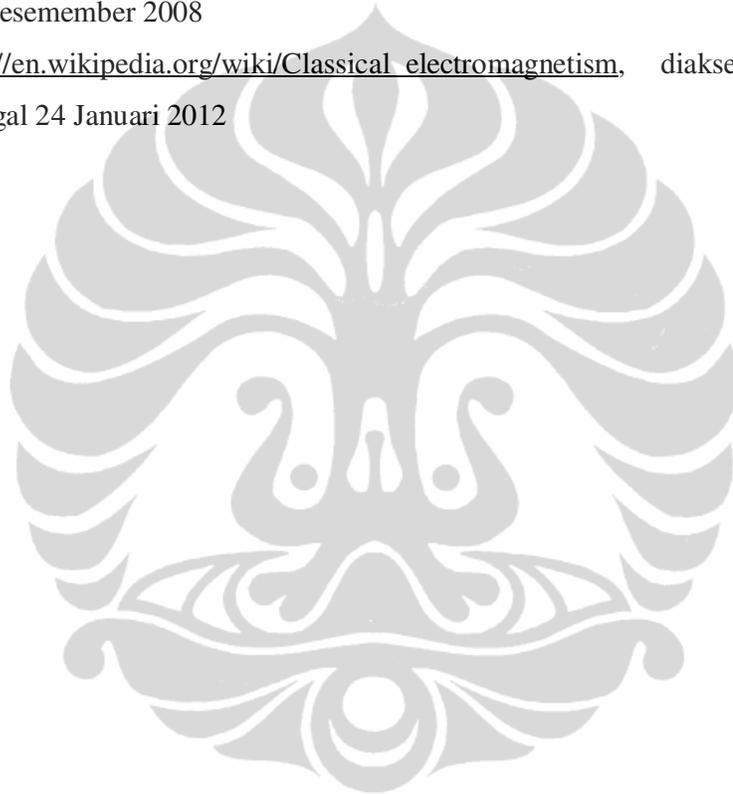
- [28] M.K. Akbar, M. Rahman, S.M. Ghiaasiaan, "Particle Transport in a Small Square Enclosure in Laminar Natural Convection", *Aerosol Science* 40:747-761, 2009.
- [29] Changfu You, Xiaohua Wang, Ruolei Liu, Ruichang Yang, "Simultaneous effects of electrostatic field and thermophoresis on inhalable particulate matter removal", *Journal of Powder Technology* 202 (95-100), 2010.
- [30] R. Tsai, J.S. Huang, "Combined effect of thermophoresis and electrophoresis on particle deposition onto a vertical flat plate from mixed convection flow through a porous medium", *Chemical Engineering Journal* 157 (52-59), 2010.
- [31] Goren SL, "Thermophoresis of Aerosol Particles in The Laminar Boundary Layer on a Flat Plate", *Journal of Colloid Interface Sci.* 61:77-85, 1977
- [32] Mills AF, Hang X, Ayazi F, "The Effect of the Wall Suction and Thermophoresis on Aerosol-Particle Deposition From a Laminar Boundary Layer on a Flat-Plate", *International Journal Heat and Mass Transfer* 27:1110-1113, 1984.
- [33] R. Tsai, "A Simple Approach for Evaluating the Effect Wall Suction and Themophoresis on Aerosol Particle Deposition From a Laminar Flow Over a Flat Plate", *Int. Communications Heat Mass Transfer* 26:249-257, 1999.
- [34] Hinds, W.C., "Aerosol Technology, 2nd edition", John Wiley & Sons, New York, 1999.
- [35] M. Epstein, G.M. Hauser, R.E. Henry, "Thermophoretic Deposition of Particles in Natural Convection Flow From a Vertical Plate", *ASME J. Heat Transf.*, Vol. 107 (272-276), 1985.
- [36] S Yilmaz and K.R. Cliffe, "Particle deposition simulation using the CFD code FLUENT", *Journal of the Institute of Energy*, , 73, pp 65-68, March 2000.
- [37] Gallis M.A., Rader D.J., Torczynski J.R., Comment on "Thermophoresis of a Near-Wall Particle at Great Knudsen Numbers", *Aerosol Science and Technology* 37:547-549 (2003).
- [38] Shimada, M., Seto, T., Okuyama, K., "Thermophoretic and Evaporational Losses of Ultrafine Particles in Heated Flow", *AIChE Journal*, 39, pp. 1859-1869, 1993.
- [39] Stratmann, F., Fissan, H., "Convection, Diffusion and Thermophoresis in Cooled Laminar Tube Flow", *Journal of Aerosol Science*, 19, (793-796), 1988.
- [40] R. Tsai, L.J. Liang, "Correlation for Thermophoretic Deposition of Aerosol Particles onto Cold Plate", *Journal of Aerosol Science* 32, pp. 473-487, 2001.
- [41] G. Santachiara, F. Prodi, C. Cornetti, "Experimental Measurements on Thermophoresis in Transition Region", *Journal of Aerosol Science* 33, pp 769-780, 2002.
- [42] Eckert, E.R.G., dan Soehngen, "Interferometric Studies on the Stability and Transition to Turbulence of a Free Convection Boundary Layer", *Proc. Gen. Discuss Heat Transfer ASME-IME*, London, 1951

- [43] Chuen-Jinn Tsai,¹ Jyh-Shyan Lin,¹ Shankar G. Aggarwal,¹ and Da-Ren Chen², *“Thermophoretic Deposition of Particles in Laminar and Turbulent Tube Flows”*, *Aerosol Science and Technology*, 38:131–139, 2004.
- [44] Zhengxian Liu, Zhengqian Chen, Mingheng Shi, *“Thermophoresis of Particles in Aqueous Solution in Micro-Channel”*, *Applied Thermal Engineering* 29:1020-1025, 2009
- [45] Xiaohua Wang, Changfu You, Ruolei Liu, Ruichang Yang, *“Particle Deposition on the Wall Driven by Turbulence, Thermophoresis and Particle Agglomeration in Channel Flow”*, *Proceeding of the Combustion Institute* 33, pp. 2821-2828, 2011.
- [46] Samira Hashemi, Ataallah Soltani Goharrizi, *“Prediction of Thermophoretic Deposition Efficiency of Particles in a Laminar Gas Flow along a Concentric Annulus : A Comparison of Developing and Fully Developed Flows”*, *Chinese Journal of Chemical Engineering Fluid Flow and Transport Phenomena*, 17:727-733, 2009.
- [47] A.M. Rashad, *“Influence of radiation on MHD free convection from vertical flat plate embedded in porous media with thermophoretic deposition of particles”*, *Communication Nonlinear Science and Numerical Simulation* 13:2213-2222, 2008.
- [48] A.Y. Bakier, Rama Subba Reddy Gorla, *“Effects of Thermophoresis and Radiation on Laminar Flow Along a Semi-Infinite Vertical Plate”*, *Journal of Heat and Mass Transfer* 47:419-425, 2011.
- [49] Anatolii D. Zimon, *“Adhesion of Dust and Powder”*, Plenum Press, New York-London, 1969.
- [50] Patrick N. Breyse, Peter S.J. Lees, *“Particulate Matter”*, The Johns Hopkins University, 2006.
- [51] Incropera, F.P., and De Witt, D.P., *“Fundamentals of Heat and Mass Transfer.”* Fourth Edition, John Wiley and Son, New York, 1996
- [52] J.P. Holman, *“Perpindahan Kalor”*, edisi keenam, Penerbit Erlangga, 1988.
- [53] Henry L. Langhaar, *“Dimensional Analysis and Theory of Models”*, ISBN-10 : 0882756826 ISBN-13 : 978-0882756820, Krieger Pub.Co., June 1980
- [54] Wiranto Arismunandar, Heizo Saito, *“Penyegaran Udara”*, Edisi IV, Pradnya Paramita, 1991
- [55] Ejup N. Ganic, Tyler G. Hicks, *“Handbook of Essential Engineering Information and Data”*, The Mc Graw-Hill, 1991.

Daftar Pustaka yang diambil dari situs internet :

- [1]. <http://princinata.blogspot.com/2010/06/polusi-pencemaran-udara-dampak-dan-24.html> diunduh pada tanggal 24 Oktober 2011

- [2]. <http://delta-electronic.com/article/wp-content/uploads/2008/09/an0088.pdf> diakses tanggal 26 November 2008
- [3]. <http://www.figarosensor.com/products/2600pdf.pdf> diakses tanggal 26 November 2008
- [4]. http://www.kalbe.co.id/files/cdk/files/09_AsmadanPolusiUdara.pdf/09_AsmadanPolusiUdara.html diakses tanggal 30 November 2008
- [5]. <http://udarakota.bappenas.go.id/view.php?page=pajanan> diakses tanggal 02 Desember 2008
- [6]. http://en.wikipedia.org/wiki/Classical_electromagnetism, diakses pada tanggal 24 Januari 2012



Lampiran 2

TGS 2600 - for the detection of Air Contaminants

Features:

- * Low power consumption
- * High sensitivity to gaseous air contaminants
- * Long life and low cost
- * Uses simple electrical circuit
- * Small size

Applications:

- * Air cleaners
- * Ventilation control
- * Air quality monitors

The sensing element is comprised of a metal oxide semiconductor layer formed on an alumina substrate of a sensing chip together with an integrated heater. In the presence of a detectable gas, the sensor's conductivity increases depending on the gas concentration in the air. A simple electrical circuit can convert the change in conductivity to an output signal which corresponds to the gas concentration.

The **TGS 2600** has high sensitivity to low concentrations of gaseous air contaminants such as hydrogen and carbon monoxide which exist in cigarette smoke. The sensor can detect hydrogen at a level of several ppm. Figaro also offers a microprocessor (FIC02667) which contains special software for handling the sensor's signal for appliance control applications.

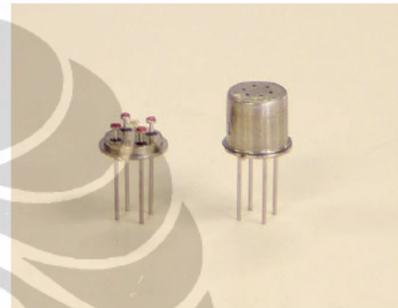
Due to miniaturization of the sensing chip, TGS 2600 requires a heater current of only 42mA and the device is housed in a standard TO-5 package.

The figure below represents typical sensitivity characteristics, all data having been gathered at standard test conditions (see reverse side of this sheet). The Y-axis is indicated as sensor resistance ratio (R_s/R_o) which is defined as follows:

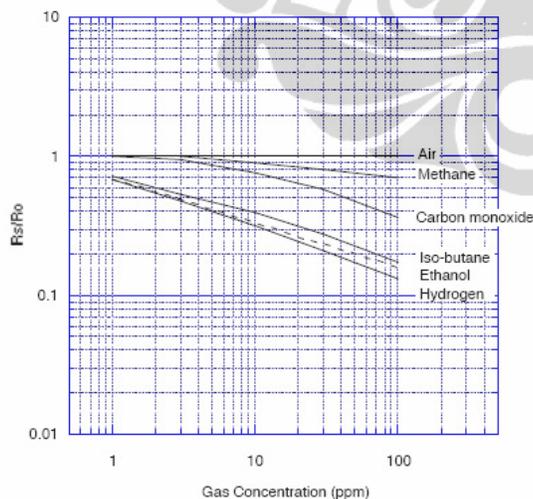
- R_s = Sensor resistance in displayed gases at various concentrations
- R_o = Sensor resistance in fresh air

The figure below represents typical temperature and humidity dependency characteristics. Again, the Y-axis is indicated as sensor resistance ratio (R_s/R_o), defined as follows:

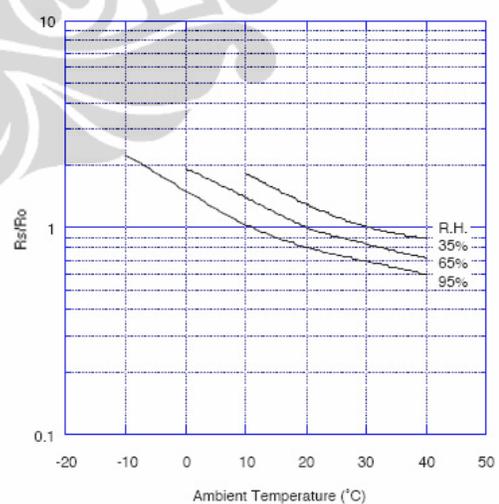
- R_s = Sensor resistance in fresh air at various temperatures/humidities
- R_o = Sensor resistance in fresh air at 20°C and 65% R.H.



Sensitivity Characteristics:



Temperature/Humidity Dependency:

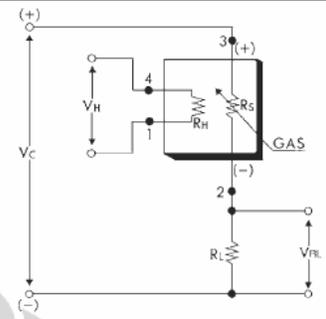


Lampiran 2 (lanjutan)

Basic Measuring Circuit:

The sensor requires two voltage inputs: heater voltage (V_H) and circuit voltage (V_C). The heater voltage (V_H) is applied to the integrated heater in order to maintain the sensing element at a specific temperature which is optimal for sensing. Circuit voltage (V_C) is applied to allow measurement of voltage (V_{out}) across a load resistor (R_L) which is connected in series with the sensor. DC voltage is required for the circuit

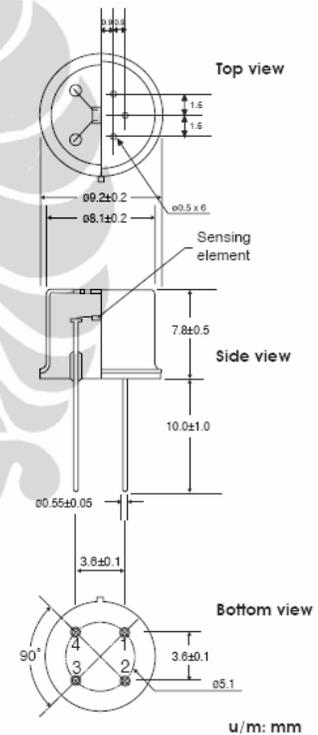
since the sensor has a polarity. A common power supply circuit can be used for both V_C and V_H to fulfill the sensor's electrical requirements. The value of the load resistor (R_L) should be chosen to optimize the alarm threshold value, keeping power consumption (P_S) of the semiconductor below a limit of 15mW. Power consumption (P_S) will be highest when the value of R_S is equal to R_L on exposure to gas.



Specifications:

Model number		TGS 2600-B00	
Sensing element type		D1	
Standard package		TO-5 metal can	
Target gases		Air contaminants	
Typical detection range		1 ~ 30 ppm of H ₂	
Standard circuit conditions	Heater voltage	V_H	5.0±0.2V DC/AC
	Circuit voltage	V_C	5.0±0.2V DC $P_S \leq 15mW$
	Load resistance	R_L	Variable 0.45kΩ min.
Electrical characteristics under standard test conditions	Heater resistance	R_H	approx. 83Ω at room temp. (typical)
	Heater current	I_H	42±4mA
	Heater power consumption	P_H	210mW $V_H=5.0V$ DC
	Sensor resistance	R_S	10k~90kΩ in air
	Sensitivity (change ratio of R_S)		0.3~0.6 $\frac{R_S(10ppm \text{ of } H_2)}{R_S(\text{air})}$
Standard test conditions	Test gas conditions	normal air at 20±2°C, 65±5%RH	
	Circuit conditions	$V_C = 5.0 \pm 0.01V$ DC $V_H = 5.0 \pm 0.05V$ DC	
	Conditioning period before test	7 days	

Structure and Dimensions:



Pin connection:

- 1: Heater
- 2: Sensor electrode (-)
- 3: Sensor electrode (+)
- 4: Heater

The value of power consumption (P_S) can be calculated by utilizing the following formula:

$$P_S = \frac{(V_C - V_{out})^2}{R_S}$$

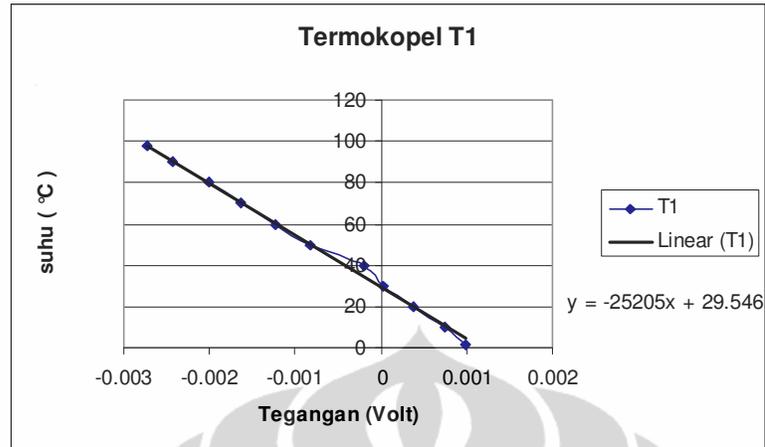
Sensor resistance (R_S) is calculated with a measured value of V_{out} by using the following formula:

$$R_S = \frac{V_C \times R_L}{V_{out}} - R_L$$

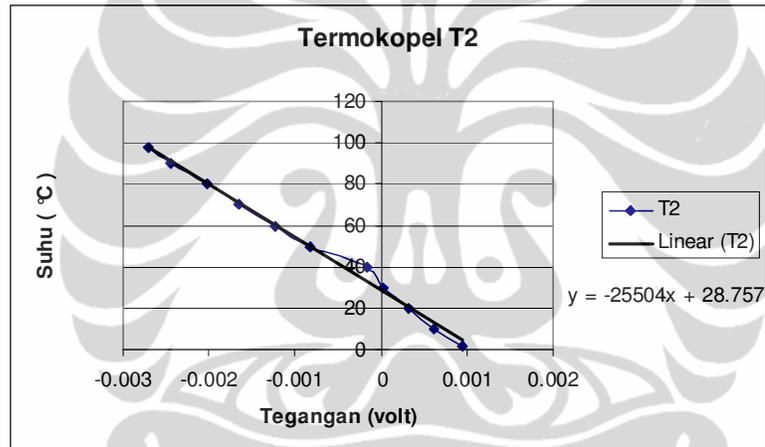
For information on warranty, please refer to Standard Terms and Conditions of Sale of Figaro USA Inc. All sensor characteristics shown in this brochure represent typical characteristics. Actual characteristics vary from sensor to sensor. The only characteristics warranted are those in the Specification table above.

FIGARO USA, INC.
121 S. Wilke Rd. Suite 300
Arlington Heights, IL 60005
Phone: (847)-832-1701
Fax: (847)-832-1705
e-mail: figarousa@figarosensor.com

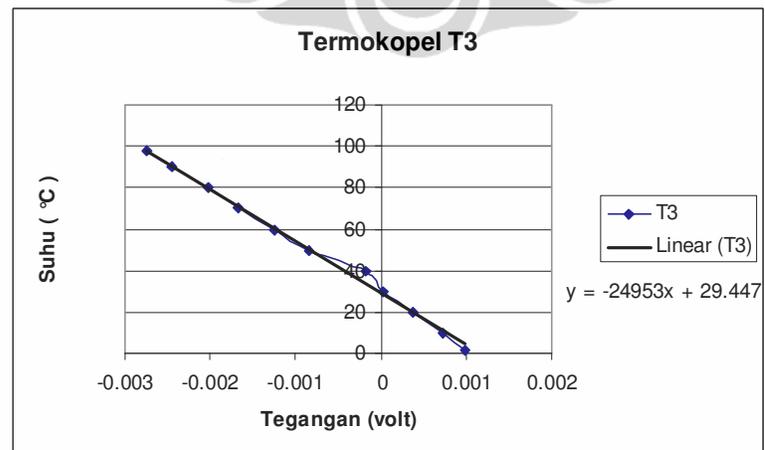
Lampiran 4



Grafik Kalibrasi Termokopel T1

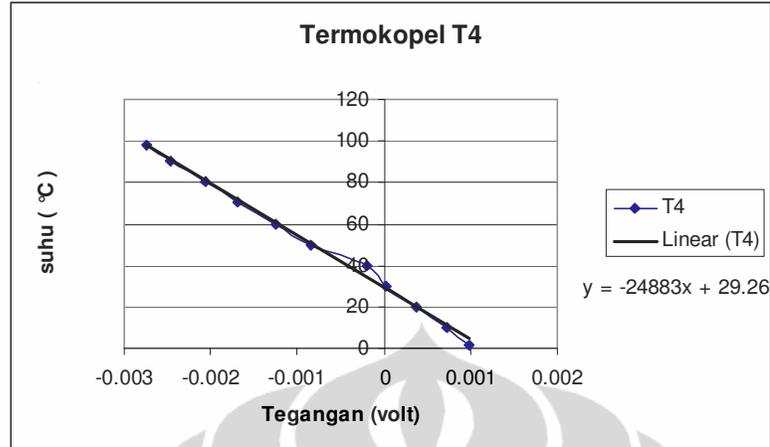


Grafik Kalibrasi Termokopel T1

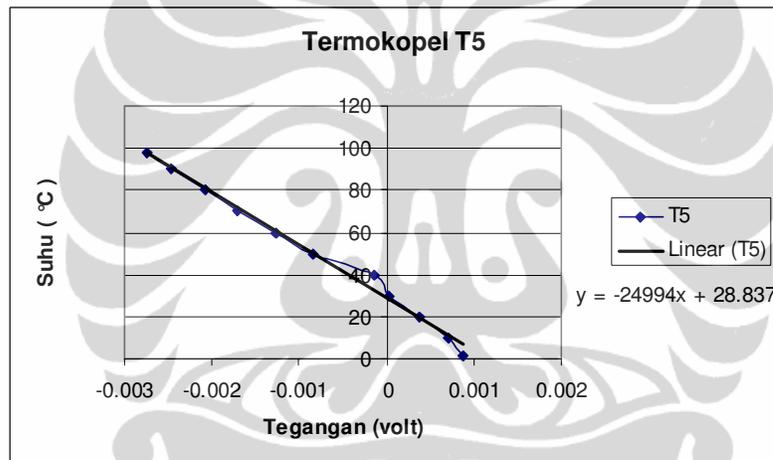


Grafik Kalibrasi Termokopel T3

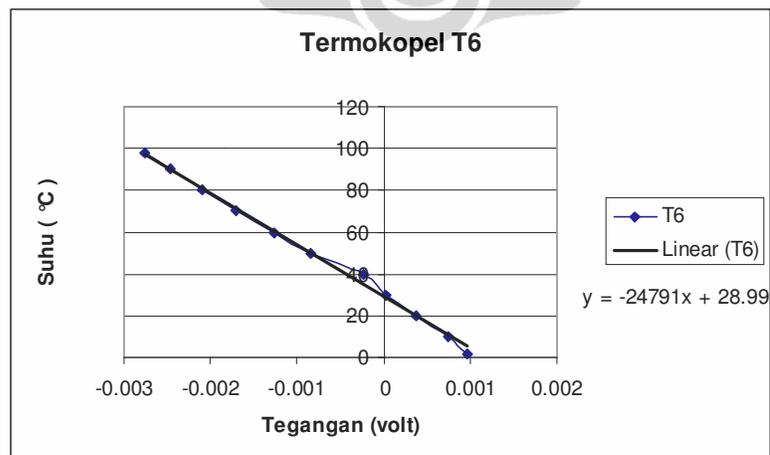
Lampiran 4 (lanjutan)



Grafik Kalibrasi Termokopel T4



Grafik Kalibrasi Termokopel T5



Grafik Kalibrasi Termokopel T6