

## Perancangan Alat Uji Thermophoresis untuk Deposit Partikel Smoke

**Imansyah Ibnu Hakim, Sio Sandra Agung**

Laboratorium Perpindahan Kalor Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknik Universitas Indonesia  
Kampus Baru UI Depok 16424  
E-mail : imansyah@eng.ui.ac.id

### Abstrak

Perbedaan temperatur yang terdapat di dalam suatu aliran partikel terhadap dinding alirannya akan menimbulkan *thermal force* yang menyebabkan partikel akan bergerak menuju dinding dengan temperatur yang lebih rendah, fenomena ini dikenal dengan istilah *thermophoresis*. Asap rokok (*tobacco smoke*) adalah salah satu bentuk dari sekian banyak bentuk aerosol. Dengan pertimbangan tersebut dan untuk mengetahui fenomena deposisi partikel rokok maka dibuat sebuah perancangan alat uji *thermophoresis*. Perancangan alat uji untuk *thermophoresis* asap rokok ini terdiri dari 3 (tiga) bagian penting yaitu: *particle delivery system*, *conditioning system*, dan *deposition system*. Ketiga sistem ini merupakan satu kesatuan dalam mekanisme untuk mendapatkan deposit partikel. Juga memiliki fungsi masing-masing sebagai penampung asap rokok, pengkondisian partikel dan aliran, serta mendeposisikan partikel rokok yang telah terkondisi. Selain itu didapat pula sistem analisis pengujiannya berupa pengambilan gambar terhadap karakteristik keluaran asap rokok dari seluruh sistem menggunakan *high speed camera* dan *particle counter*. Sehingga dapat diperoleh data mengenai perubahan karakteristik smoke akibat dari efek *thermophoresis*.

**Keywords:** *smoke particle, thermophoresis, deposition*

### 1. Pendahuluan

Penyebaran partikel fluida yang mengalir di dalam suatu saluran merupakan hal yang sangat penting untuk diketahui, karena hal ini berkaitan erat dengan upaya yang dilakukan guna memperoleh sistem yang optimal. Mekanisme aliran ini berlangsung secara terus menerus dan mengakibatkan terbentuknya deposit (penumpukan) partikel pada dinding-dinding saluran tersebut. Pendekatan perpindahan panas yang melibatkan gradien temperatur ( $\nabla T$ ) merupakan konsep yang digunakan untuk menganalisa terbentuknya deposit partikel tersebut. Salah satu konsep untuk menggambarkan hal ini ialah melalui *thermophoresis* yang merupakan metode dalam menganalisa terbentuknya deposit partikel aerosol melalui aplikasi gradien temperatur di dalam sistem.

Fenomena *particle deposition* banyak dijumpai dalam beberapa proses, seperti: *air cleaning*, *hot-gas filtration*, *coal combustion*, *chemical vapor deposition*, *powder coating*, dan lain-lain. *Air cleaning* adalah suatu proses yang dilakukan untuk mendapatkan udara bersih dan bebas dari zat-zat yang tidak diharapkan. Adapun akibat yang ditimbulkan dari proses deposisi partikel ini ialah terbentuknya pengotoran pada dinding yang akan menjadi suatu hambatan bagi aliran dan dapat menyebabkan kerusakan pada permukaan dinding tersebut.

Beberapa penelitian telah banyak menunjukkan adanya level efisiensi dari metode ini dalam menggambarkan fenomena deposit partikel dan mengeliminasi partikel yang mengalir pada sebuah *channel*. Di antara penelitian yang dimaksud yaitu He and Ahmadi (1998); *Particle Deposition with Thermophoresis in Laminar and Turbulent Duct Flow*, dalam penelitiannya ditemukan bahwa ukuran partikel aerosol yang kecil memiliki pengaruh besar dalam proses deposisi partikel. Lin and Tsai (2004); *Thermophoretic Deposition of Particles in Laminar Flow*, dalam penelitian ini dijelaskan secara akurat pengaruh gradien temperatur ( $\nabla T$ ) pada partikel terhadap proses deposit di dalam sebuah saluran, dan lain-lain.

Isu yang berkembang mengenai asap rokok telah memicu untuk menjadikan salah satu jenis aerosol—smoke ini sebagai material penelitian dan pengujian (*specimen*) dalam upaya untuk mengaplikasikan fenomena *thermophoresis* tersebut. Dalam hal ini sesuai dengan klasifikasinya sebagai bentuk aerosol, dapat diketahui bahwa asap rokok (*tobacco smoke*) itu mampu untuk

terdeposi pada sebuah dinding saluran tertentu. Dengan demikian perlu dirancang sebuah mekanisme awal yang sistematis untuk mengamati fenomena seperti yang digambarkan sebelumnya.

## 2. Landasan Teori

### 2.1 Theorema Thermophoresis

Thermophoresis adalah fenomena yang menggambarkan dinamika partikel dari suatu aliran fluida yang mengalami dispersi/tersebar dalam sistem akibat terdapatnya gradien temperatur pada sistem tersebut. Pergerakan partikel dalam sistem itu ialah bergerak menuju daerah-daerah yang memiliki temperatur lebih rendah. Jika terdapat gradien temperatur di dalam suatu volume udara maka partikel cenderung akan bergerak ke daerah yang lebih dingin (Sippola, 2002). Perbedaan temperatur akan menyebabkan terbentuknya perbedaan momentum pada partikel yang menempati *region* di dalam sistem volume kontrol. Dalam kaitannya dengan penelitian *thermophoresis* dan pengaruh yang sangat signifikan dari karakteristik aerosol, ada 3 (tiga) jenis gaya yang menjadi perhatian yaitu : *Thermal, Diffusional, and Gravitational (sedimentational) force*. Setiap gaya-gaya ini memiliki peranan dalam proses terbentuknya deposit partikel aerosol, namun demikian terdapat beberapa perbedaan antara yang satu dengan yang lainnya.

#### 2.1.1 Thermal Force

*Thermal force* merupakan gaya yang timbul akibat adanya gradien temperatur di dalam sistem. Gaya ini bersifat proporsional terhadap gradien temperatur, semakin besar gradien maka gaya yang terjadi pun semakin besar. Gaya *thermophoresis* ( $F_{th}$ ) ini mampu memberikan pengaruh yang signifikan dalam fenomena pergerakan partikel. Secara spesifik gaya ini memberikan pengaruh yang besar pada kondisi aliran dengan diameter partikel  $0,1 \mu\text{m} < d_p < 1 \mu\text{m}$  (Cippola, 2001). “*For particles with  $0,1 \mu\text{m} \leq d \leq 1 \mu\text{m}$ , the thermophoretic force becomes the dominant transport mechanism, and control the particle deposition rate*” (He and Ahmadi, 1998).

#### 2.1.2 Diffusional Force

Difusifitas pada gas yang mengalir akan menyebabkan terjadinya penumpukan partikel pada dinding. Hal ini terjadi karena adanya perbedaan / gradien konsentrasi partikel-partikel didalamnya. Proses ini dikenal dengan istilah *diffusive deposition* yang terjadi pada kondisi non-uniform dan isothermal gas mixture (Davies, 1966). Proses difusi hanya terjadi pada kondisi partikel yang sangat kecil ( $d_p \approx 0,01$ ) sehingga memberikan efek deposisi pada dinding aliran (He and Ahmadi, 1998). “*For particles of the order of  $0,01 \mu\text{m}$  ....The brownian motion is the dominant dispersion mechanism*” (He and Ahmadi, 1998).

#### 2.1.3 Gravitational Force

Jenis gaya yang ketiga ini adalah gaya yang dipengaruhi kuat oleh gravitasi bumi. Partikel yang memiliki massa jenis yang lebih besar dari massa jenis udara sekitarnya ( $\rho_a \ll \rho_p$ ) akan memberikan pengaruh berupa gaya gravitasi pada sistem deposisi aerosol. Besarnya gaya gravitasi ini akan meningkat seiring dengan meningkatnya ukuran diameter partikel di dalam sistem. Dari data diketahui nilai *density* dari tobacco smoke ialah  $1,1 \text{ g/cm}^3$ .

Akan tetapi dalam pembahasan mengenai kecepatan aerosol, disebutkan bahwa *settling velocity* merupakan indikator untuk mengetahui apakah terjadi transportasi atau sedimentasi pada sistem. *Settling velocity* adalah kecepatan minimum yang diperlukan oleh fluida untuk terjadinya transportasi partikel dan terhindar dari pengaruh gravitasi.

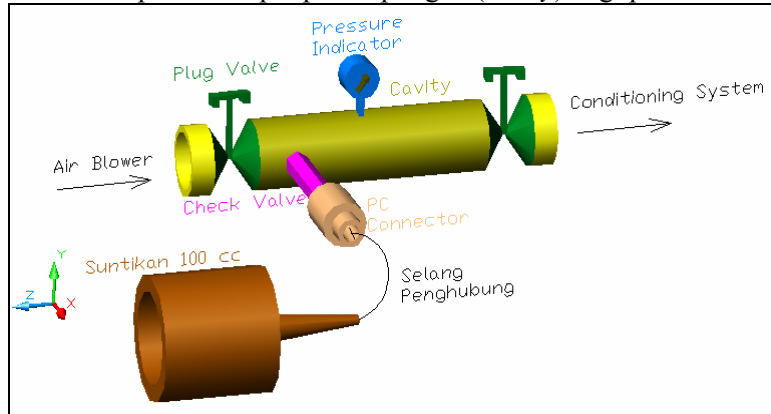
| Particle Size, $\mu\text{m}$ | Setting Velocity |
|------------------------------|------------------|
| 0,1                          | 0,4 nm/s         |
| 1,0                          | 40 nm/s          |
| 10                           | 30 nm/s          |
| 100                          | 0,3 m/s          |
| <i>Sumber: Holman, 2001</i>  |                  |

## 2.2 Mekanisme Rancangan Alat

Perencanaan alat uji *thermophoresis* dibagi menjadi 3 (tiga) bagian utama, yakni: *particle delivery system*, *conditioning system*, dan *deposition system*. Ketiga sistem ini merupakan sebuah rangkaian seri satu dengan lainnya.

### a. Particle Delivery System

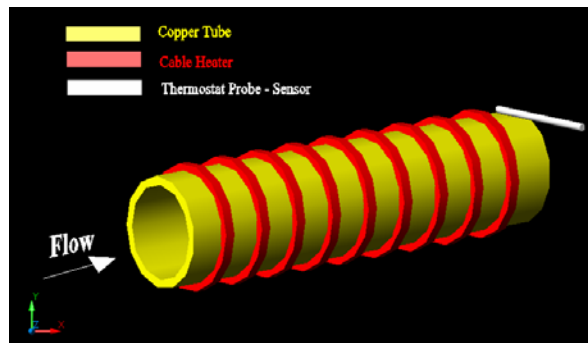
Sistem ini merupakan sistem awal atau pertama pada perancangan alat pengujian *thermophoresis* dan merupakan tempat penampungan (*cavity*) bagi partikel aerosol *smoke*.



Gambar 1. Particle Delivery System

### b. Conditioning System

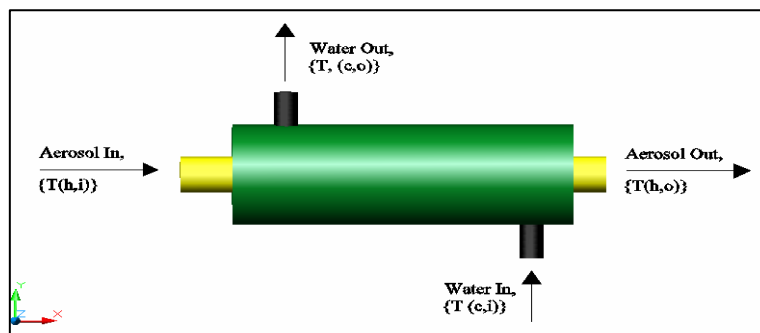
Sistem ini merupakan bagian dari alat yang berfungsi untuk menaikkan temperatur partikel aerosol *smoke* yang mengalir di dalamnya dan dinaikkan sampai dengan nilai yang diinginkan.



Gambar 2. Conditioning System

### c. Deposition System

Sistem ketiga ini dapat berupa sistem heat exchanger – *concentric tube* – yang terdiri dari lubang *tube* yang berfungsi sebagai tempat mengalirnya *hot aerosol* dan lubang anulus sebagai media pendingin yang menggunakan media air.



Gambar 3. Deposition System

## 2.3 Analisis Aliran Fully Developed Flow

Kondisi aliran yang berkembang penuh (*fully developed*) adalah salah satu faktor kondisi yang harus dicapai sebelum melakukan analisa. Di dalam kondisi *fully developed* ini fluida memberikan sedikit perubahan pada profil kecepatan sepanjang *channel* (Incropera, 1996).

## 2.4 Heat Exchanger

Dalam perancangan alat *thermophoresis* ini terdapat alat penukar kalor yang digunakan sebagai *deposition system*. Alat penukar kalor ini sebagai komponen yang memiliki dinding dengan temperatur yang rendah (dingin) sehingga menyebabkan terbentuk gradien temperatur antara aerosol yang mengalir dengan dinding alirannya. Penukar kalor aliran silang banyak dipakai dalam pemanasan dan pendinginan udara atau gas. Dari beberapa pengujian *thermophoresis* bentuk concentric tube memiliki keuntungan, salah satu keuntungannya ialah mudah dikerjakan dan memiliki efisiensi kerja yang baik, sehingga banyak digunakan sebagai komponen *deposition system*. “*The cooling section consisted of a counterflow water-cooled annular heat exchanger*” (Romary, F. J., 1997). *Heat exchanger* ini berupa aliran air yang mengalir secara terus-menerus pada bagian anulusnya untuk menjaga kondisi dinding tetap pada temperatur standar. Pengukuran temperatur dapat diketahui dengan menggunakan *thermocouple* yang diletakkan pada kedua ujung sistem pendingin tersebut.

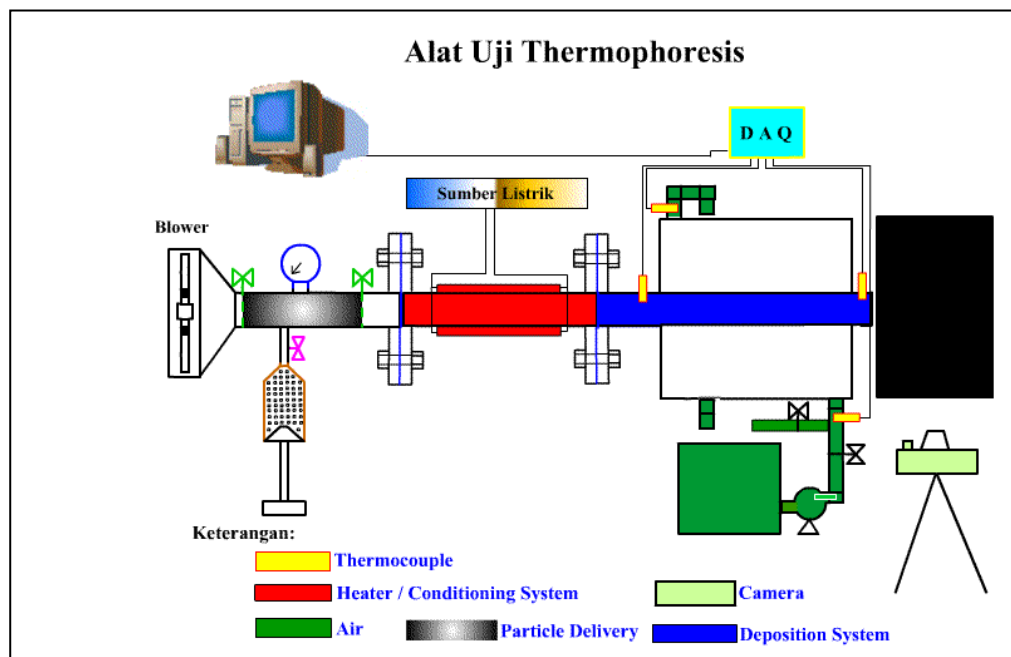
## 2.5 Pengukuran Temperatur

Dalam perancangan ini, mekanisme pengukuran temperatur ialah mengukur temperatur aliran aerosol dan air yang terdapat pada sistem heat exchanger, yaitu pada sisi masuk dan keluar tiap-tiap bagian sistem. Alat ukur dapat menggunakan sebuah *thermocouple* standar tipe K, dengan ukuran yang berbeda-beda untuk setiap aliran yang diukur. Hal ini disebabkan terdapat perbedaan luasan bidang yaitu antara *tube* dan anulus pada heat exchanger.

Adapun prinsip kerja *thermocouple* ialah berdasarkan perbedaan tegangan yang timbul sebagai *junction* pada kedua material konduktor pembentuknya. Perbedaan tegangan itu dikenal dengan istilah emf (*electromotive force*) sebagai fungsi dari gradien temperatur dalam material, yang dikenal pula sebagai efek *seebeck* dan nilainya tergantung pada komposisi material yang digunakan.

Sedangkan mekanisme pembacaan tegangan itu menggunakan sebuah data akuisisi (DAQ). DAQ ini merupakan data akuisisi yang dapat menerima input baik analog maupun digital serta dapat menghasilkan output analog maupun digital.

## 3. Alat Pengujian Partikel Tobacco Smoke



Gambar 4. Skema Alat Pengujian

### Mekanisme Kerja Alat

Perancangan alat uji *thermophoretic* ini bekerja untuk mengkondisikan aerosol *smoke* sehingga mampu mengalami deposisi partikel pada sistem. Mengkondisikan aerosol berarti meningkatkan temperatur aerosol sampai dengan maximum 200 °C pada suatu *conditioning system*, dan meneruskan aliran itu menuju *deposition system*.

Mekanisme ini berawal dari mengkondisikan sistem sampai dengan temperatur yang telah ditentukan dalam setiap pengujian dan mengatur kecepatan *blower* sampai dengan 10 cm/s. Setelah proses itu selesai dilaksanakan maka tahap berikutnya ialah memasukan aerosol *smoke* ke dalam *cavity* pada sistem *particle delivery* dengan menggunakan suntikan yang telah terisi oleh *smoke*. Pekerjaan ini dilakukan sampai pada tekanan 2 (dua) bar.

Pengkondisian merupakan proses pemanasan oleh *heater*. Adapun *heater* bekerja akibat adanya arus listrik yang dialirkan dari sistem elektrikal, dengan sistem ini pula *heater* dapat dihentikan saat temperatur yang ditentukan dalam pengujian telah tercapai. Proses ini berlangsung dengan menggunakan *thermal thermostat* sebagai kontrol temperatur. Setelah aerosol mengalami pengkondisian sampai pada temperatur tertentu maka tahap pembentukan gradien temperatur pada aerosol itu terjadi saat aliran memasuki sistem deposisi yang berupa sistem heat exchanger dengan temperatur dinding yang lebih rendah.

Sebagai data pengujian, perancangan alat uji untuk analisis deposit partikel ini menggunakan *camera* untuk mendapatkan foto bentuk kepekatan dari *smoke* dan jumlah partikel yang keluar dari sistem. Dengan sistem pengkondisian yang berbeda-beda (temperatur *setting* pengujian berbeda-beda) itu, maka akan didapatkan pula perbedaan data pada *camera*. Hal ini berfungsi untuk menunjukkan terjadinya deposit partikel *smoke* melalui sistem *thermophoresis*.

### Sistem Pengujian

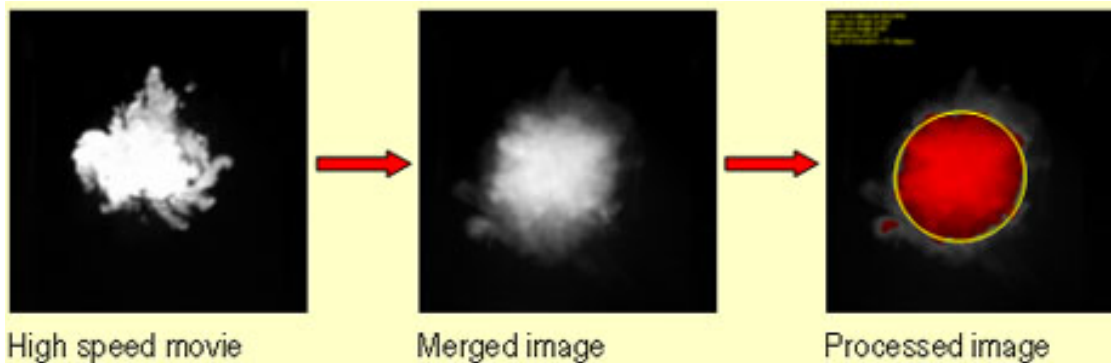
1. Sistem kontrol temperatur menggunakan thermostat yang sederhana. Mekanisme ini masih memberikan deviasi terhadap nilai temperatur yang dijaga. Dari data yang diperoleh, di dalam sistem *thermostat* ini terdapat deviasi:
  - Saat *thermostat* dan *heater* bekerja, *thermostat* akan berhenti setelah +10 °C dari temperatur yang di *set*.
  - Saat *thermostat* berhenti, maka akan kembali bekerja setelah -10 °C dari temperatur *setting* awal.
2. Mekanisme pengambilan data berupa pengambilan gambar dari bentuk *spray* aerosol *smoke* yang keluar dari sistem. Adapun sistem pengambilan gambar itu menggunakan sebuah *high speed camera* dengan ketentuan:
  - Mampu untuk menangkap bentuk sebaran *smoke*
  - Mampu untuk menggambarkan partikel yang tersebarBerikut salah satu contoh bentuk sebaran *smoke* yang dapat dilihat.



Sumber: Sonaer Ultrasonic

**Gambar 5. Smoke Spraying**

Adapun contoh dari beberapa analisa terhadap bentuk sebaran *smoke* ini antara lain seperti pada Gambar 6. :



Sumber: Oxford Lasers Imaging Division

**Gambar 6. Sistem Pengambilan Data Pengujian**

Dengan menggunakan data tersebut maka dapat dilakukan **analisa** berupa persentase luasan (A) sebaran *smoke* terhadap luasan dari *capture* yang diambil pada tiap-tiap perbedaan temperatur ( $\nabla T$ ) pengujian, pada titik pengamatan / *capture* yang sama.

Sehingga dapat digambarkan dalam bentuk grafik *trend* penurunan persentase luasan (A) tersebut akibat efek *thermoporesis* ( $\nabla T$ ), luasan (A) yang dimaksud dapat diartikan sebagai kepekatan *smoke* setelah mengalami deposisi partikel pada temperatur pengujian yang berbeda-beda.

Selain itu, dengan menggunakan *high speed camera* ini dapat pula diketahui partikel aerosol, seperti terlihat pada Gambar 7.



Sumber: Oxford Lasers Imaging Division

**Gambar 7. Foto Partikel menggunakan High Speed Camera**

Dari data diatas dapat dibuat sebuah analisa yang menggambarkan perbedaan jumlah massa ( $G_p$ ) *smoke* yang keluar dari sistem pada tiap-tiap temperatur pengujian. Perhitungan massa ( $G_p$ ) partikel dilakukan dengan cara:

- Memperkecil daerah *capture* gambar pada satu titik yang sama dan waktu yang sama
- Menghitung jumlah partikel yang terlihat dan menghitung jumlah seluruh massa partikelnya menggunakan data density yang ada.

#### **Alat Ukur Partikel**

Selain dengan menggunakan *camera*, pengukuran jumlah partikel dapat pula dilakukan dengan sebuah *particle counter* seperti terlihat pada Gambar 8. :



Sumber: Terra Universal

**Gambar 8. Airborne Particle Counter**

Adapun beberapa hal mengenai aplikasi alat tersebut antara lain; Mampu untuk pengukuran partikel dari 0,1 – 1  $\mu\text{m}$ , sampel waktu pengujian alat dari 1 detik sampai dengan 24 jam, memiliki format rekaman yang baik. Secara detail aplikasi tersebut dapat dilihat dari spesifikasi berikut ini:

**Tabel 2. Spesifikasi Airbone Particle Counter**

**Specifications**

|                      |   |
|----------------------|---|
| Size Channels:       | Refer to ordering chart   |
| Flow Rate:           | 1.0 cfm (28.3 lpm)  |
| Flow Control:        | Electronic meter with rear-panel adjustment   |
| Light Source:        | HeNe laser (0.1 sensitivity models); Laser diode, 10-year MTTF (0.3 and 0.5 sensitivity models) |
| Vacuum Pump:         | Carbon-free, non-contaminating reciprocating pump   |
| Zero Count:          | Less than one count every 5 minutes   |
| Display:             | Red LED, 7 digits   |
| Outputs:             | Built-in printer; RS232/RS485 Serial Interface  |
| Sample/Hold Time:    | 1 second to 24 hours  |
| Alarm Counts:        | 0 to 9,999,999  |
| Location Labels:     | 0 to 999, numeric   |
| Count Data:          | Total counts, counts/ft <sup>3</sup> , counts/m <sup>3</sup>                                    |
| Coincidence Loss:    | Less than 5% at 40,000 particles/ft <sup>3</sup>  |
| FS209E Calculations: | Mean of averages, standard deviation, standard error, UCL                                       |
| Auto CDA Purge:      | Purge solenoid activated by connection to CDA (0.1 sensitivity models only)                     |
| Data Storage:        | 400 sample points   |
| Power:               | 115 VAC; 110 watts  |

**Environment:**

|                       |   |                            |
|-----------------------|---|----------------------------|
| Operating:            | 55 to 84°F (12 to 29°C); 20 - 95%RH, noncondensing                                    |                            |
| Storage:              | -10 to 160°F (-23 to 70°C); Up to 98%RH, noncondensing                                |                            |
| Accessories Included: | Isokinetic probe with tripod; Purge Filter; Printer Paper; AC Cord; Operator's Manual |                            |
| Physical:             | 0.1 sensitivity models  | 0.3/0.5 sensitivity models |
|                       | 13.5"W x 22"D x 7"H   | 11.2"W x 18"D x 6.0"H      |
| Weight:               | 42 lbs.   | 24 lbs.                    |

#### 4. Kesimpulan

1. Dari perancangan yang telah dilakukan maka ada 3 (tiga) sistem utama dalam pengujian:
  - Particle Delivery System
  - Conditioning System
  - Deposition system, yang saling berhubungan satu dengan yang lain.
2. Dengan terdapatnya gradien temperatur di dalam sistem maka akan terjadi fenomena *thermophoresis* di dalam sistem itu
3. Melalui rancangan yang telah dilakukan, data pengamatan berupa gambar yang diperoleh dari sebuah *high speed camera* yang kemudian dianalisa:
  - Bentuk sebaran/kepekatan smoke, dan
  - Berat partikel yang tertangkap *camera* terhadap gradien temperatur pengujian.

#### 5. Daftar Pustaka

- Bober, and Kenyon, *Fluid Mechanics*, 1980, John Wiley & Sons, Canada
- Cipolla, J., Busnaina, A., and McGruer, N., *the Transport of Contaminants in Thin Film Deposition Processes*, 2001, Northeastern University
- Davies, C. N., *Aerosol Science*, 1966, vol. I & II, Academic Press, London and New York
- He, C., and Ahmadi, G., *Particle Deposition with Thermophoresis in Laminar and Tubulent Duct Flows*, 1998, *Aerosol Science and Technology* 29:525-546, USA
- Hinds, W. C., *Aerosol Technology: Properties, Behaviour, and Measurement of Airborne Particles*, 1982, John Wiley & Sons, New York
- Holman, J. P., *Experimental Methods for Engineers*, 2001, 7<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill, New York
- Imansyah, I. H., et al., *Studi Experimen Thermophoretic Force pada Permukaan Perpindahan Panas*, 2005, Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia, Depok
- Incropera, F. P., and DeWitt, D. P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 1996, John Wiley & Sons, Canada
- Raswari, Ir., *Teknologi dan Perencanaan Sistem Perpipaian*, 1986, Universitas Indonesia, Jakarta
- Romary, F. J., et al., *Thermophoretic Deposition of Particles in Turbulent Pipe Flow*, 1998, *J. Aerosol Science* Vol. 29 No.8, USA
- Sippola, M. R., and Nazaroff, W. W., *Particle Deposition from Turbulent flow*, 2002, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley California
- Stolk, J., and Kros, C., *Elemen Mesin*, 1984, edisi ke-21, Erlangga, Jakarta
- Tsai, C. J., Lin, J. S., Aggarwal, S. G., and Chen, D. R., *Thermophoretic Deposition of Particles in Laminar and Turbulent Flows*, 2004, *Aerosol Science and Technology* 38:131-139, USA