

BAB II

DASAR TEORI

2.1 DEFINISI PENCEMARAN UDARA

Pencemaran udara adalah suatu kondisi di mana kualitas udara menjadi rusak dan terkontaminasi oleh zat-zat, baik yang tidak berbahaya maupun yang membahayakan kesehatan tubuh manusia. Pencemaran udara biasanya terjadi di kota-kota besar dan juga daerah padat industri yang menghasilkan gas-gas yang mengandung zat di atas batas kewajaran.

Rusaknya atau semakin sempitnya lahan hijau atau pepohonan di suatu daerah juga dapat memperburuk kualitas udara di tempat tersebut. Semakin banyak kendaraan bermotor dan alat-alat industri yang mengeluarkan gas yang mencemarkan lingkungan akan semakin parah pula pencemaran udara yang terjadi. Untuk itu diperlukan peran serta pemerintah, pengusaha dan masyarakat untuk dapat menyelesaikan permasalahan pencemaran udara yang terjadi.

2.2 ZAT-ZAT PENCEMAR UDARA

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 Metromini. 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 (NO_x)

Kira-kira 90% dari emisi NO_x adalah disebabkan proses thermal NO_x, dan tercatat bahwa dengan penggunaan HFO (Heavy Fuel Oil), bahan bakar yang biasa digunakan di kapal, menyumbangkan emisi NO_x sebesar 20-30%. 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 berwarna 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. 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 pada tahun 1987 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, 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 EFEK NEGATIF PENCEMARAN UDARA

Pencemaran udara selain memiliki dampak terhadap kesehatan juga dapat menyebabkan gangguan sebagai berikut:

1. Gangguan aestetik dan fisik seperti terganggunya pemandangan dan pelunturan warna bangunan dan pengotoran
2. Merusak kehidupan tumbuhan yang terjadi akibat adanya penutupan pori pori tumbuhan sehingga mengganggu jalannya photo sintesis
3. Merubah iklim global regional maupun internasional
4. Mengganggu perhubungan/ penerbangan yang akhirnya mengganggu kegiatan sosial ekonomi di masyarakat
5. Mengganggu kesehatan manusia seperti timbulnya iritasi pada mata, alergi, gangguan pernafasan dan kanker pada paru-paru.

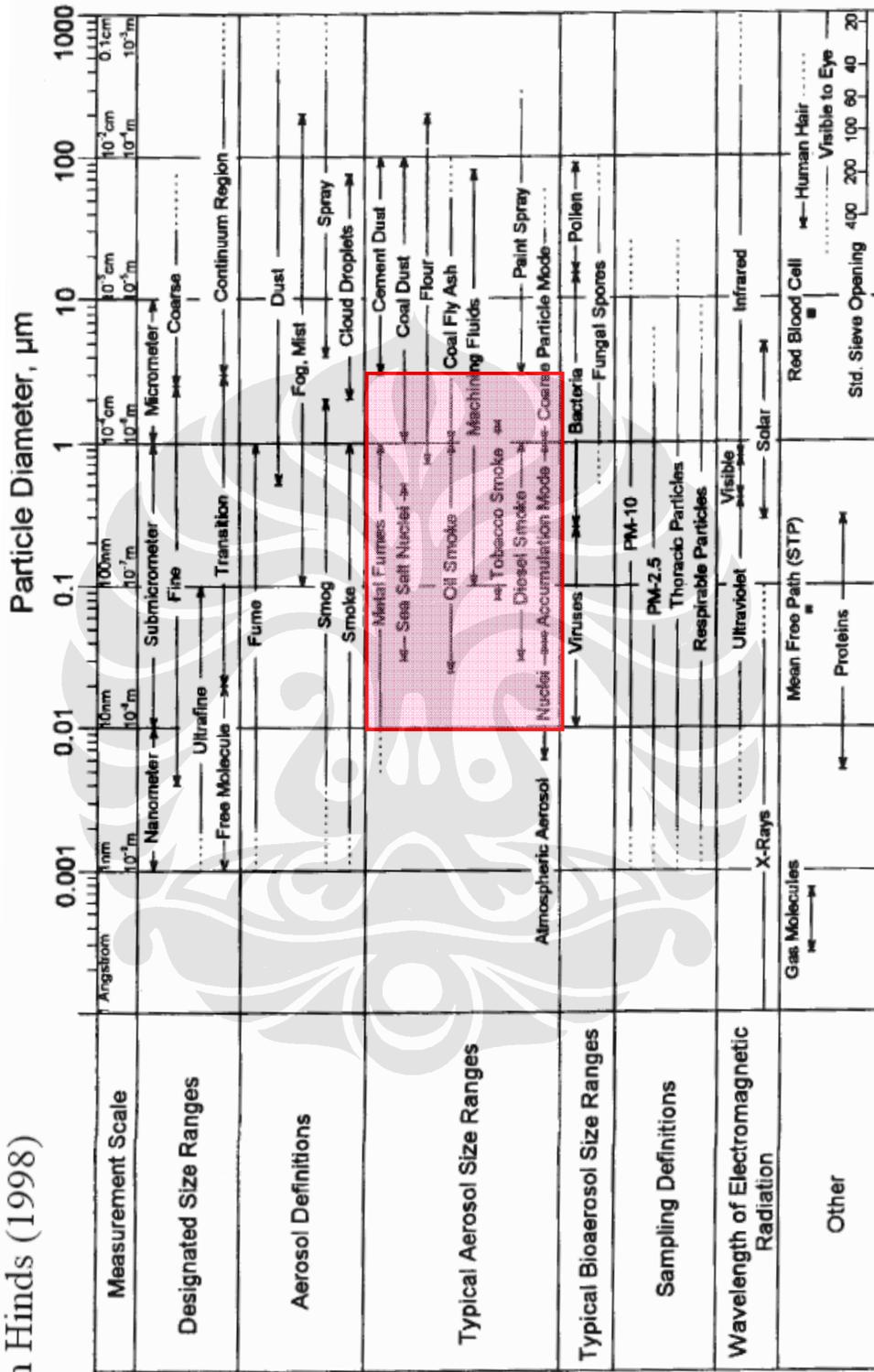
2.4 PEMBAGIAN DEBU MENURUT DIMENSI

Setiap ukuran partikel memiliki sifat dan karakter tersendiri yang berpengaruh terhadap cara pengendaliannya. Pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.2 dapat dilihat ukuran, sifat dan karakter partikel berikut dengan cara pengendaliannya.



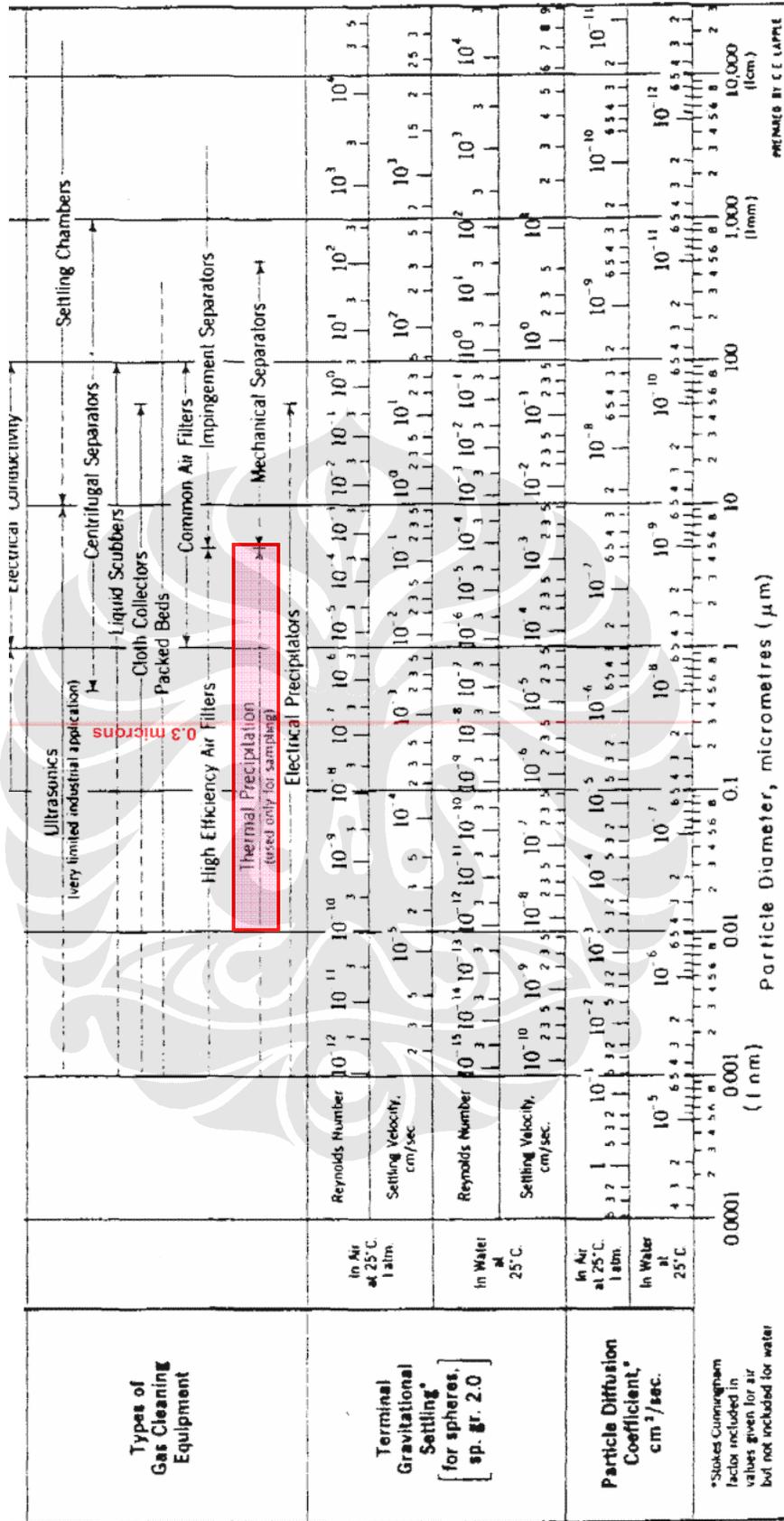
Gambar 2.1 Diagram Particle Size ranges and definition for aerosol

From Hinds (1998)



Sumber : Hinds, 1998

Gambar 2.2 Diagram Particle Size and Cleaning Type



Sumber : Air Pollution Control Engineering, De Nevers, 2003.

Dari Gambar 2.1 dapat dilihat bahwa ada berbagai jenis aerosol antara lain :

- a. *Dust*
- b. *Smoke*
- c. *Fume*
- d. *Mist*
- e. *Fog*
- f. *Smog*
- g. *Cloud Droplets*

Aerosol merupakan partikel dari zat padat atau cair yang tersuspensi dalam gas. Pada simulasi ini akan menggunakan partikel smoke. Smoke adalah partikel-partikel dengan geometry bola yang dihasilkan dari proses pembakaran. *Tobacco smoke* yang digunakan dalam simulasi ini memiliki diameter partikel yaitu $0,01 \mu\text{m} \leq D_p \leq 1 \mu\text{m}$.

Adapun spesifikasi dari partikel uji sebagai berikut :

Tabel 2.1 Spesifikasi Smoke

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Jenis Aerosol	Smoke	
2	Nama Aerosol	Tobacco Smoke	
3	Diameter partikel	0,01 ~ 1	μm
4	Density	1,1	g/cm^3
5	Molecular mass	162,23	g/mol
6	Boiling point	247	$^{\circ}\text{C}$

Pada Gambar 2.2 disebutkan ada beberapa metode pembersihan aerosol (type of gas cleaning equipment) antara lain yaitu :

- a. *Therma precipitator*

Efektif digunakan pada partikel yang berukuran $0,001 \mu\text{m} \leq D_p \leq 5 \mu\text{m}$.

b. *Setling Chamber*

Efektif digunakan pada partikel yang berukuran lebih dari 10 μm .

c. *Centrifugal separators*

Efektif digunakan pada partikel yang berukuran $0,05 \mu\text{m} \leq D_p \leq 100 \mu\text{m}$.

d. *High Efficiency Air Filter*

Efektif digunakan pada partikel yang berukuran $D_p \leq 0,5 \mu\text{m}$.

e. *Impingement Separators*

Efektif digunakan pada partikel yang berukuran $5 \mu\text{m} \leq D_p \leq 5 \text{mm}$.

f. *Mechanical Separators*

Efektif digunakan pada partikel yang berukuran $5 \mu\text{m} \leq D_p \leq 500 \mu\text{m}$

Dengan mengetahui macam-macam metode pembersihan aerosol, untuk jenis aerosol tobacco smoke yang mempunyai ukuran partikel $0,01 \mu\text{m} \leq D_p \leq 1 \mu\text{m}$ maka jika dilihat dalam tabel yang paling efektif adalah dengan menggunakan metode *thermal precipitator*. Metode ini menggunakan prinsip *thermophoretic force* untuk menangkap partikel-partikel smoke. Oleh karena itu *thermal precipitator* ini dapat digunakan untuk *dust / smoke collector*.

Untuk melihat sejauh mana efektifitas dari metode pembersihan aerosol maka perlu dilakukan eksperimen. Untuk melakukan eksperimen diperlukan waktu yang relatif lama dan biaya yang tinggi, maka sebelum melakukan eksperimen perlu dilakukan simulasi terhadap pergerakan aerosol terlebih dahulu.

Kondisi simulasi yang sudah pernah dilakukan sebelumnya yaitu sebagai berikut :

- Diameter Partikel : 1 μm
- Jarak antar palt : 5 mm
- Variasi temperatur : 50K – 250K

Beda dengan simulasi yang akan dilakukan yaitu diameter partikel lebih variasi, jarak antar plat lebih kecil dan beda temperatur lebih kecil.

Pada awal tahun 2008 telah dilakukan eksperimen fenomena thermophoresis yaitu tentang Thermal precipitator sebagai smoke collector berbasis thermophoretic force dengan jarak antar plat 5 mm dan beda temperatur 10K dan 20K , tetapi eksperimen ini tidak bisa dilakukan simulasi untuk beda temperatur diatas 20K, sehingga perlu dikembangkan eksperimen yang lebih jauh.

Didalam United States Patent No. US 6,666,905 B2 tanggal 23 December 2003 disebutkan bahwa Thermal precipitator sebagai pengumpul partikel dengan memanfaatkan gaya thermophoresis mempunyai efisiensi 99.9% untuk ukuran diameter partikel kurang dari 5 μ m. Thermal precipitator ini sebagai pemanasnya menggunakan thermoelektik atau peltier sehingga kapasitas panas yang dicapai maksimam 80F.

Agar pada eksperimen berikut diperoleh hasil yang optimal maka sebelum melakukan eksperimen yang lebih jauh perlu dilakukan simulasi terlebih dahulu. Simulasi yang akan dibahas pada bab ini adalah simulasi pergerakan partikel plat horizontal dengan memanfaatkan gaya thermophoresis untuk aplikasi pada *smoke collector*.

2.5 GAYA-GAYA YANG MEMPENGARUHI PERGERAKAN SUATU PARTIKEL

Semua benda bergerak karena adanya pengaruh dari lingkungan sekitar, dengan tidak mengabaikan momentum benda itu sendiri. Demikian juga dengan partikel debu, smoke ataupun asap rokok. Setiap partikel yang bergerak pada suatu media mendapatkan gaya-gaya dari luar yang menyebabkan partikel tersebut bergerak, antara lain disebabkan oleh :

2.5.1 Gaya Thermophoresis (Thermophoretic Force)

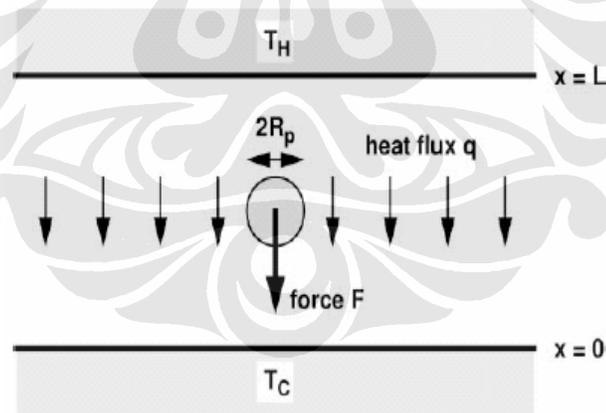
Thermophoresis adalah fenomena pergerakan partikel dalam suatu aliran fluida yang tersebar pada suatu sistem yang diakibatkan oleh perbedaan temperatur dalam sistem tersebut. Partikel bergerak dari zona temperatur panas menuju zona temperatur rendah. Hal ini disebabkan oleh adanya transfer momentum dari lingkungan sekitar ke partikel melalui

media panas. Pergerakan partikel dalam sistem itu 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.

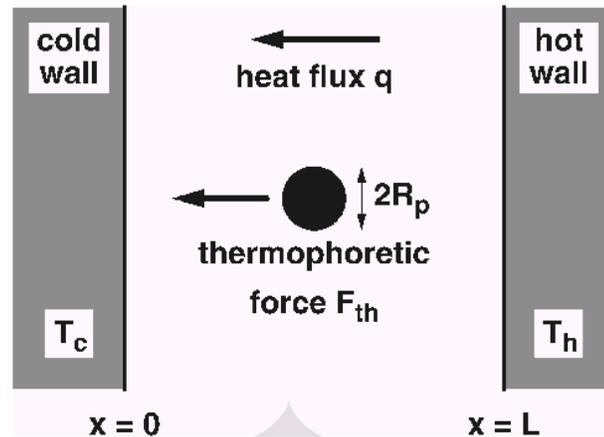
Lingkungan sekitar partikel diasumsikan dalam kondisi diam tanpa adanya gerakan udara dan tidak ada gaya-gaya lain yang bekerja pada partikel.

Gaya thermophoresis memiliki aplikasi dalam berbagai bidang diantaranya untuk *aerosol thermal precipitator*, pembuatan serat optik, pembersihan gas, safety pada reaktor nuklir, proses pembuatan semiconductor dan perlindungan permukaan benda dari deposisi partikel.

Gaya thermophoresis mempunyai pengaruh yang dominan pada pergerakan partikel yang berukuran $0,01 \mu m \leq d_p \leq 1 \mu m$. Diluar ukuran tersebut maka gaya thermophoresis tidak dominan mempengaruhi pergerakan partikel, melainkan gaya lainnya.



Gambar 2.3 Gaya Thermophoresis yang melewati pelat horizontal



Gambar 2.4 Gaya Thermophoresis yang melewati pelat vertikal

Persamaan dasar gaya thermophoresis adalah sesuai dengan yang dirumuskan oleh Talbott, yaitu :

$$F = \frac{6\pi.Dp.\mu^2.Cs.(K + Ct.Kn)}{\rho(1 + 3Cm.Kn)(1 + 2K + 2Ct.Kn)} \frac{1}{T} \frac{\delta T}{\delta x} \quad (2.1)$$

Dimana, Kn = Knudsen number = $2\lambda/Dp$

λ = 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 Talbott didasarkan atas asumsi partikel berbentuk bola dengan fluida gas ideal.

Sedangkan penelitian lebih lanjut oleh para ilmuwan menghasilkan persamaan thermophoresis yang diaplikasikan berdasarkan kondisi fluida. Terdapat tiga persamaan yang dikutip dibawah, yaitu :

1. *Continuum Gas* (Waldman) :

$$F_x = -\frac{16}{15} \pi^{\frac{1}{2}} \cdot \beta \cdot R p^2 \cdot K_f \cdot \frac{\delta T}{\delta x} \quad (2.2)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{m}{2kT}} \quad \text{dimana, } Kn_p \rightarrow \infty, \quad Kn_s \rightarrow 0$$

Jika jarak partikel (mean free path) bernilai lebih kecil dibandingkan dengan ukuran sistem, maka domain dapat dianggap kontinyu. Formula Waldman diatas proporsional langsung terhadap gradien temperature dan konduktivitas thermal, tetapi independen terhadap tekanan ataupun massa jenis partikel (selama sesuai dengan kriteria Knudsen Number).

2. Gas molekul bebas / *Free Molecular gas* (Brock, Phillips, Torczynski)

$$F = -\left(\frac{3}{2} \pi R_p\right) \left(\frac{T_H^{\frac{1}{2}} - T_C^{\frac{1}{2}}}{T_H^{\frac{1}{2}} + T_C^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (2.3)$$

$$P = nKT_C^{\frac{1}{2}} T_H^{\frac{1}{2}} \quad \text{dimana, } Kn_p \rightarrow \infty, \quad Kn_s \rightarrow 0$$

Jika mean free path lebih besar dibandingkan dengan ukuran sistem, domain dapat dianggap sebagai free molecular gas. Kesimpulan utamanya adalah gaya thermophoretic secara linier tergantung pada tekanan molekul bebas terhadap dinding.

3. Daerah Transisional (Phillips)

$$F = -\left(\frac{32}{15\pi}\right) \left(\frac{\pi R_p^2}{c}\right) \left(\frac{K(T_H - T_C)}{L}\right) \left(\frac{\frac{45\pi}{128} N + N^2}{1 + N + N^2}\right) \quad (2.4)$$

$$\text{dimana } N = \frac{14}{15} \frac{L\rho\rho}{2\mu}, c = \sqrt{\frac{8kT}{\pi n}}$$

Jika mean free path adalah pangkat dari ukuran sistem, gaya thermophoretic menjadi sulit untuk diprediksikan akurat. Perhitungan diatas dinilai paling lemah dibandingkan perhitungan lain. Dapat ditarik kesimpulan bahwa ketergantungan terhadap tekanan lebih lemah dibanding ketergantungan terhadap kecepatan molekular.

2.5.2 Gaya gravitasi

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

$$F_g = m_d g = \frac{4}{3} \pi \cdot r_d^3 \rho_d \cdot g \quad (2.5)$$

Keterangan :

m_d = massa partikel

ρ_d = massa jenis partikel

r_d = jari-jari partikel

g = tetapan gravitasi

2.5.3 Gaya Elektrophoresis

Gaya elektrophoresis 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 nilai tegangan dalamnya 220 Volt.

2.5.4 Gaya Apung (*Bouyancy Force*)

Bouyancy Force timbul karena adanya perbedaan viskositas pada suatu fluida. Pada fluida yang berbentuk gas, viskositas akan menurun seiring dengan peningkatan temperatur, sedangkan pada fluida berbentuk cair peningkatan temperatur akan mengurangi viskositasnya.

Jika temperatur suatu gas dinaikkan, molekul-molekul gas tersebut yang memiliki viskositas yang lebih rendah akan bergerak keatas menggantikan molekul-molekul gas yang viskositasnya lebih tinggi. Pergerakan molekul-molekul gas ini ternyata juga memberikan pengaruh pada partikel yang berada satu sistem dengan gas, dimana partikel tersebut

juga akan ikut terangkat. Terangkatnya partikel tersebut sebagai akibat peningkatan temperatur pada fluida gas inilah yang disebut *bouyancy force*.

Pengaruh *bouyancy force* pada suatu partikel dalam suatu fluida dapat diketahui dari cara perpindahan panas yang dialami fluida tersebut. Perpindahan panas yang dialami oleh fluida terjadi secara konveksi, dan konveksi ini dapat dibedakan lagi menjadi konveksi alamiah atau konveksi paksa. *Bouyancy force* hanya muncul pada konveksi yang terjadi secara alamiah. Untuk menentukan jenis konveksi yang terjadi dapat ditentukan dari perbandingan nilai *Grasshoff* dan nilai *Rayleigh* kuadrat fluida tersebut.

$$\frac{Gr}{Re^2} \ll 1 \text{ Konveksi alamiah diabaikan}$$

$$\frac{Gr}{Re^2} \sim 1 \text{ Konveksi alamiah dan konveksi paksa dipertimbangkan}$$

$$\frac{Gr}{Re^2} \gg 1 \text{ Konveksi paksa diabaikan}$$

Dari perbandingan diatas maka, gaya *bouyancy* dapat diabaikan jika perbandingan nilainya lebih besar dari 1 (satu).

Sedangkan rumus untuk menentukan nilai *Grasshoff* dan *Reynold* pada suatu plat lurus adalah:

$$* \text{ Nilai Grasshoff} \rightarrow Gr = \frac{\rho^2 g \beta \Delta T x^3}{\mu^2} \quad (2.6)$$

Keterangan:

ρ = density udara [kg/m^3]

g = percepatan gravitasi [m^2/s]

ΔT = perbedaan temperatur gas antara plat dan lingkungan [K]

x = panjang plat [m]

μ = viskositas dinamik gas pada suhu T_{abs} [kg/m.s]

dan β adalah koefisien ekspansi termal gas, dimana untuk gas ideal

nilainya = $\frac{1}{T_{abs}}$, sehingga persamaannya menjadi:

$$Gr = \frac{g \cdot \Delta T \cdot L^3}{T_{abs} \cdot \nu^2} \quad (2.7)$$

* Nilai *Reynolds* \rightarrow $Re = \frac{\rho \cdot u \cdot x}{\mu}$

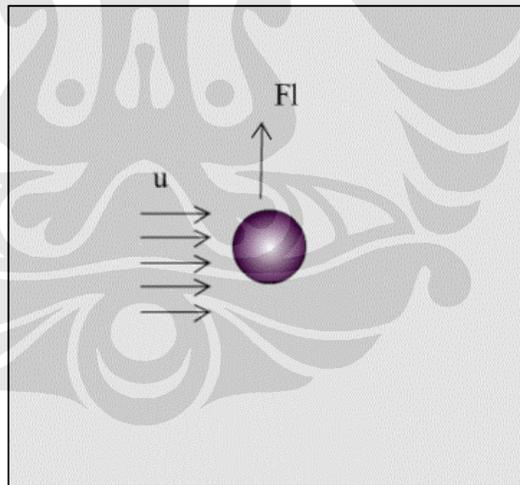
u = kecepatan fluida [m/s]

untuk menghitung koefisien gesek sebagai berikut :

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.8)$$

2.5.5 Gaya angkat Saffman (*Saffman Lift Force*)

Adalah gaya angkat pada suatu partikel yang disebabkan oleh adanya gesekan antara partikel dengan aliran fluida.



Gambar 2.5 Gaya angkat Saffman pada partikel

Gaya angkat Saffman dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dari Saffman, yaitu :

$$F = \frac{2K.v^2.\rho.d_{ij}^{\frac{1}{2}}}{\rho_p D_p (d_{lk} . d_{kl})^{\frac{1}{4}}} (u_i - u_{ip}) \quad (2.9)$$

Persamaan tersebut diatas hanya berlaku untuk fluida dengan Bilangan Reynold yang kecil.

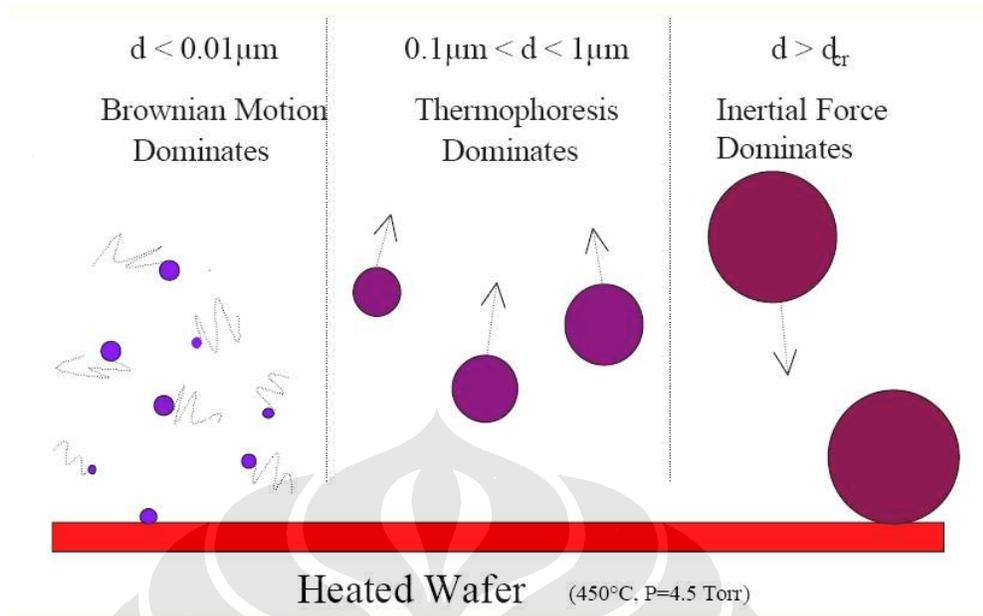
2.5.6 *Pergerakan Brownian (Brownian Movement)*

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 aliran turbulen, pergerakan Brownian tidak berlaku.

Untuk mengetahui efektivitas dari gerak brownian, gaya thermophoresis dan momen inersia terhadap pergerakan partikel, berikut perbandingan pergerakannya:



Gambar 2.6 Pergerakan partikel pada umumnya