

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. Sedangkan dari lembaga penelitian ataupun perguruan tinggi berperan untuk membuat suatu penelitian mengenai pembuatan alat uji atau terobosan teknologi tepat guna untuk mengurangi pencemaran udara.

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)

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

1. Thermal NO_x (Extended Zeldovich Mechanism)

Proses ini disebabkan gas nitrogen yang beroksidasi pada suhu tinggi pada ruang bakar (>1800K). Thermal NO_x ini didominasi oleh emisi NO (NO_x =NO+ NO₂).

2. Prompt NO_x

Formasi NO_x ini akan terbentuk cepat pada zona pembakaran.

3. Fuel NO_x

NO_x formasi ini terbentuk karena kandungan N dalam bahan bakar.

Kira-kira 90% dari emisi NO_x 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 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. 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 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, 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 oksida oleh molekul sulfur.

2.3 EFEK NEGATIF PENCEMARAN UDARA

Tabel 2.1 menjelaskan tentang pengaruh pencemaran udara terhadap makhluk hidup. Rentang nilai menunjukkan batasan kategori daerah sesuai tingkat kesehatan untuk dihuni oleh manusia. Karbon monoksida, nitrogen, ozon, sulfur dioksida dan partikulat matter adalah beberapa parameter polusi udara yang dominan dihasilkan oleh sumber pencemar. Dari pantauan lain diketahui bahwa dari beberapa kota yang diketahui masuk dalam kategori tidak sehat berdasarkan ISPU (Indeks Standar Pencemar Udara) adalah Jakarta (26 titik), Semarang (1 titik), Surabaya (3 titik), Bandung (1 titik), Medan (6 titik), Pontianak (16 titik), Palangkaraya (4 titik), dan Pekanbaru (14 titik).

Tabel 2.1 Pengaruh Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU)

Kategori	Rentang	Karbon monoksida (CO)	Nitrogen (NO ₂)	Ozon (O ₃)	Sulfur dioksida (SO ₂)	Partikulat
Baik	0-50	Tidak ada efek	Sedikit berbau	Luka pada Beberapa spesies tumbuhan akibat kombinasi dengan SO ₂ (Selama 4 Jam)	Luka pada Beberapa spesies tumbuhan akibat kombinasi dengan O ₃ (Selama 4 Jam)	Tidak ada efek
Sedang	51 - 100	Perubahan kimia darah tapi tidak terdeteksi	Berbau	Luka pada Beberapa spesies tumbuhan	Luka pada Beberapa spesies tumbuhan	Terjadi penurunan pada jarak pandang
Tidak Sehat	101 - 199	Peningkatan pada kardiovaskular pada perokok yang sakit jantung	Bau dan kehilangan warna. Peningkatan reaktivitas pembuluh tenggorokan pada penderita asma	Penurunan kemampuan pada atlet yang berlatih keras	Bau, Meningkatnya kerusakan tanaman	Jarak pandang turun dan terjadi pengotoran debu di mana-mana
Sangat Tidak Sehat	200-299	Meningkatnya kardiovaskular pada orang bukan perokok yang berpenyakit Jantung, dan akan tampak beberapa kelemahan yang terlihat secara nyata	Meningkatnya sensitivitas pasien yang berpenyakit asma dan bronchitis	Olah raga ringan mengakibatkan pengaruh pamafasan pada pasien yang berpenyakit paru-paru kronis	Meningkatnya sensitivitas pada pasien berpenyakit asma dan bronchitis	Meningkatnya sensitivitas pada pasien berpenyakit asma dan bronchitis
Berbahaya	300 - lebih	Tingkat yang berbahaya bagi semua populasi yang terpapar				

Sumber: Bapedal, 2002.

Tabel 2.2 Sumber dan Standar Kesehatan Emisi Gas Buang

Pencemar	Sumber	Keterangan
Karbon monoksida (CO)	Buangan kendaraan bermotor; beberapa proses industri	Standar kesehatan: 10 mg/m ³ (9 ppm)
Sulfur dioksida (SO ₂)	Panas dan fasilitas pembangkit listrik	Standar kesehatan: 80 ug/m ³ (0.03 ppm)
Partikulat Matter	Buangan kendaraan bermotor; beberapa proses industri	Standar kesehatan: 50 ug/m ³ selama 1 tahun; 150 ug/m ³
Nitrogen dioksida (NO ₂)	Buangan kendaraan bermotor; panas dan fasilitas	Standar kesehatan: 100 pg/m ³ (0.05 ppm) selama 1 jam
Ozon (O ₃)	Terbentuk di atmosfer	Standar kesehatan: 235 ug/m ³ (0.12 ppm) selama 1 jam

Sumber: Bapedal, 2002.

Tabel 2.2 memperlihatkan sumber emisi dan standar kesehatan yang ditetapkan oleh pemerintah melalui keputusan Bapedal. BPLHD Propinsi DKI Jakarta pun mencatat bahwa adanya penurunan yang signifikan jumlah hari dalam kategori baik untuk dihirup dari tahun ke tahun sangat mengkhawatirkan. Dimana pada tahun 2000 kategori udara yang baik sekitar 32% (117 hari dalam satu tahun) dan di tahun 2003 turun menjadi hanya 6.85% (25 hari dalam satu tahun). Hal ini menandakan Indonesia sudah seharusnya memperketat peraturan tentang pengurangan emisi baik sektor industri maupun sektor transportasi darat/laut. Selain itu tentunya penemuan-penemuan teknologi baru pengurangan emisi dilanjutkan dengan pengaplikasiannya di masyarakat menjadi suatu prioritas utama bagi pengendalian polusi udara di Indonesia.

2.4 AEROSOL

Aerosol merupakan partikel dari zat padat atau cair yang tersuspensi dalam gas. Partikel-partikel yang berasal dari beragam jenis karakteristik kimiawi akan membentuk jenis-jenis aerosol sebagai:

- a. *Dust*
- b. *Smoke*
- c. *Fume*
- d. *Mist*

- e. *Fog*
- f. *Smog*
- g. *Cloud Droplets*

Secara khusus pembuatan *thermal precipitator* ini menggunakan *smoke* yang merupakan bagian dari aerosol tersebut. *Smoke* adalah partikel-partikel dengan geometri bola yang dihasilkan dari proses pembakaran. *Tobacco smoke* yang digunakan dalam penelitian ini memiliki diameter partikel yang kecil yaitu $0,01 \mu m \leq d_p \leq 1 \mu m$.

Pada penelitian ini, aerosol / partikel yang akan digunakan adalah *smoke* (asap rokok). Dasar pemilihan *smoke* ini karena merupakan salah satu pencemar udara dan mudah digunakan, serta dapat mewakili kondisi polusi udara di Indonesia.

Adapun spesifikasi dari partikel uji sebagai berikut :

Tabel 2.3 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	$^{\circ}C$

Untuk metode pembersihan aerosol (*type of gas cleaning equipmet*) diketahui ada beberapa macam tipe pembersihan antara lain *thermal precipitator*, *ultrasonics* (penggunaanya sangat terbatas hanya pada beberapa industri saja), *setling chambers* (efektif digunakan pada partikel berukuran lebih dari $10 \mu m$), *centrifugal separators* (digunakan pada partikel berukuran $0,5 \mu m \leq d_p \leq 100 \mu m$), *high efficiency air filters* (digunakan pada partikel berukuran $d_p \leq 0,5 \mu m$), *impingement separators* (digunakan pada partikel berukuran $5 \mu m \leq d_p \leq 5 m$), *mechanical separators* (digunakan pada partikel berukuran $5 \mu m \leq d_p \leq 500 \mu m$), dan masih banyak lagi.

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



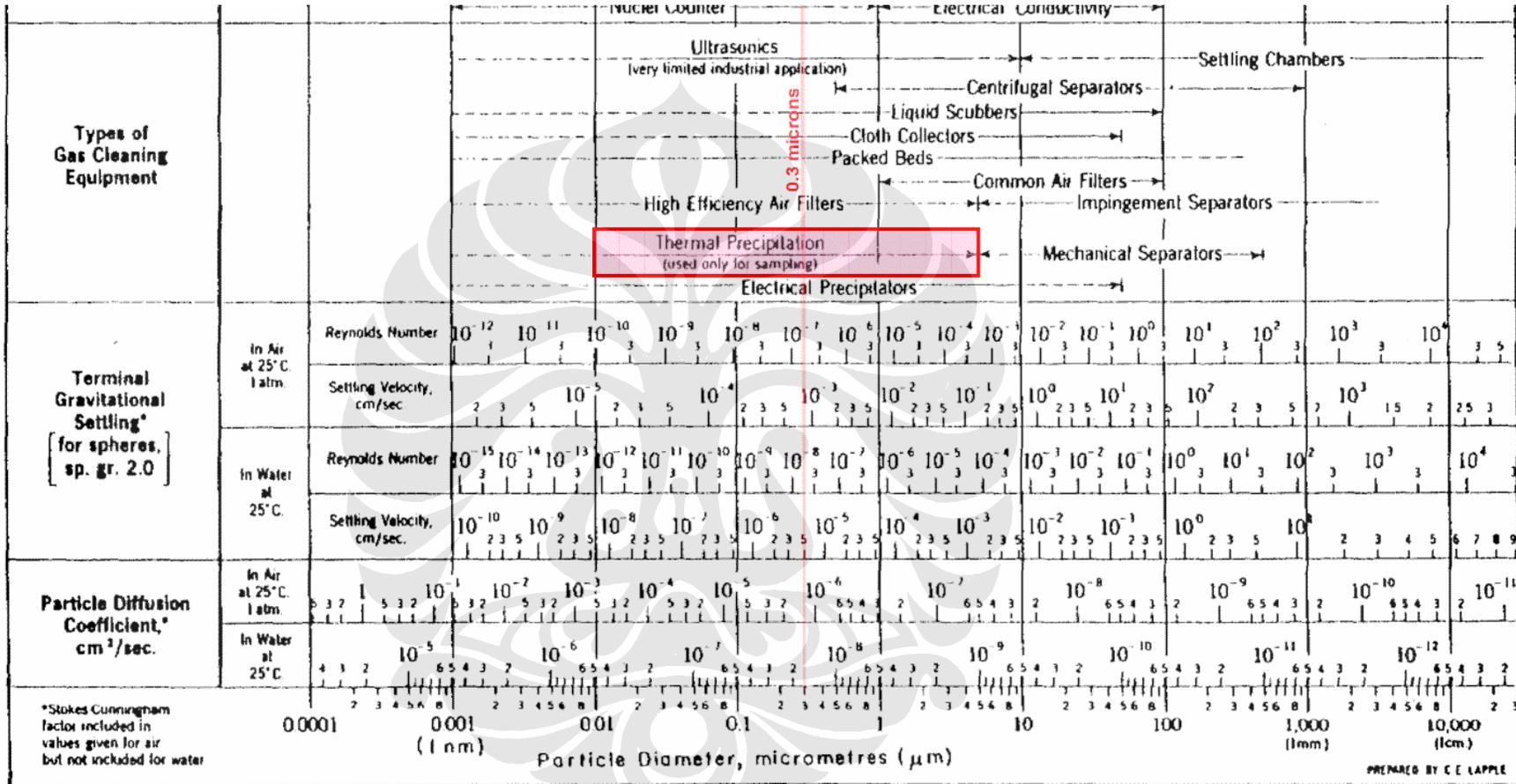
Gambar 2.1 Diagram Particle size ranges and definitions for aerosol

From Fuchs (1959)

	Particle Diameter, μm					
	0.01	0.1	1	10	100	1000
Micromerons (1000)	0.01	0.1	1	10	100	1000
Colloidal range & range	0.001	0.1	1	10	100	1000
Aerosol	0.01	0.1	1	10	100	1000
Light scattered by Rayleigh	0.001	0.1	1	10	100	1000
Typical industrial size ranges	0.01	0.1	1	10	100	1000
Respirable dust range	0.01	0.1	1	10	100	1000
Respirable dust range	0.01	0.1	1	10	100	1000
Other	0.01	0.1	1	10	100	1000

Sumber : Hinds, 1998

Gambar 2.2 Diagram Particle Size and Cleaning Type



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

2.5 AEROSOL FORCE

Pada fenomena *thermophoresis*, partikel-partikel bergerak dan memiliki kecepatan, nilai kecepatan ini dapat dipengaruhi oleh gradien temperatur. Selain memiliki kecepatan, partikel itu juga mengalami *force* (gaya). Gaya yang terjadi akan mempengaruhi pergerakan partikel pada suatu sistem. Dalam kaitannya dengan penelitian *thermophoresis* dan pengaruh yang sangat signifikan dari karakteristik aerosol, ada 3 (tiga) jenis gaya yang menjadi perhatian yaitu :

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 ini memberikan pengaruh yang cukup dominan pada kondisi aliran dengan diameter partikel $0,1 \mu\text{m} < d_p < 1 \mu\text{m}$.

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 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).

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.

2.6 GAYA-GAYA YANG BEKERJA PADA 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 :

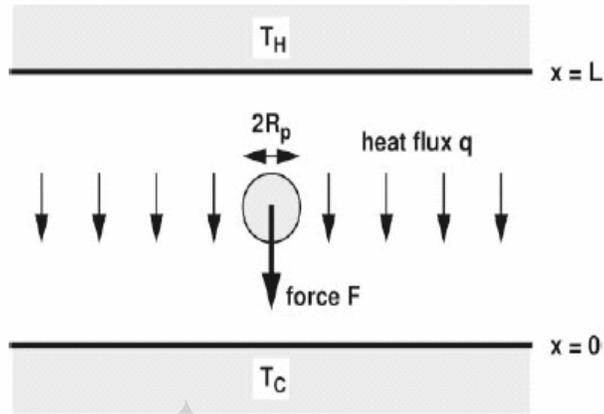
2.6.1 Gaya Thermophoresis (*Thermophoretic Force*)

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.

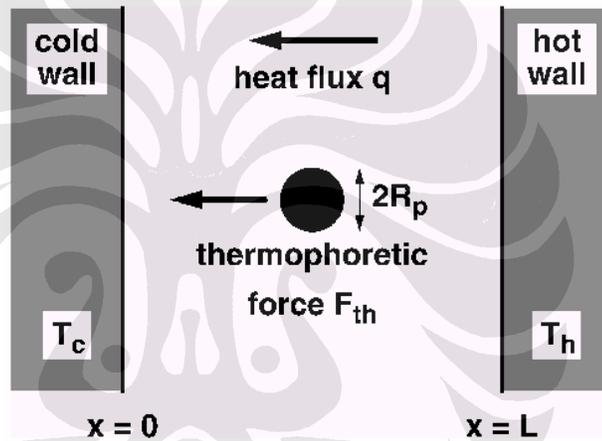
Lingkungan sekitar partikel diasumsikan dalam kondisi diam tanpa adanya gerakan udara dan tidak ada gaya-gaya lain yang bekerja pada partikel.

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.

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



Gambar 2.3 Gaya Thermophoresis yang melewati pelat horisontal



Gambar 2.4 Gaya Thermophoresis yang melewati pelat vertikal

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

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

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

λ = jarak tempuh partikel

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

Kp adalah konduktivitas thermal partikel

Cs = 1.17, Ct = 2.18, Cm = 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) :

$$F_x = -\frac{16}{15} \pi^{\frac{1}{2}} \cdot \beta \cdot R_p^2 \cdot k_f \cdot \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots (2.2)$$

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

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)

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

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

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

3. Daerah Transisional (Phillips)

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

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

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.

2.6.2 Gaya gravitasi

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

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

Keterangan :

m_d = massa partikel

ρ_d = massa jenis partikel

r_d = jari-jari partikel

g = tetapan gravitasi

2.6.3 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.

2.6.4 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 ke atas 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 Grashoff dan nilai Rayleigh kuadrat fluida tersebut.

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

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

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

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:

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

Keterangan:

g = percepatan gravitasi [m²/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:

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

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

u = kecepatan fluida [m/s]

2.6.5 Gaya angkat Saffman (*Saffman Lift Force*)

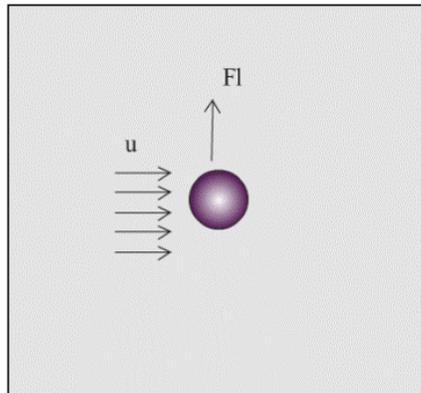
Adalah gaya angkat pada partikel jika partikel tersebut dikenai oleh aliran udara yang memiliki kecepatan. Rumusnya adalah:

$$F_L(saff) = 1,615 \cdot \rho \cdot \nu^{1/2} \cdot d^2 (u^f - u^p) \left[\frac{du^f}{dy} \right]^{1/2} \text{sgn} \left(\frac{du^f}{dy} \right) \dots\dots\dots (2.8)$$

Akan tetapi gaya angkat saffman ini hanya dapat digunakan jika memenuhi batasan-batasan:

$$R_{es} = \frac{|u_f - u_p| d}{\nu} \ll 1 \qquad R_{e\Omega} = \frac{\Omega d^2}{\nu} \ll 1$$

$$R_{es} = \frac{\gamma d^2}{\nu} \ll 1 \qquad \varepsilon = \frac{R_{eG}^{1/2}}{R_{es}} \gg 1$$



Gambar 2.5 Gaya angkat Saffman pada partikel

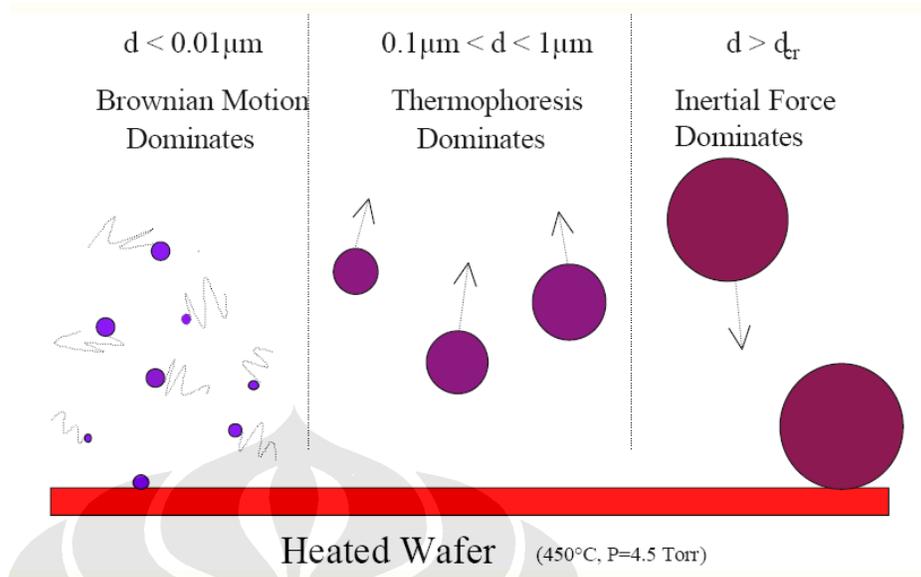
2.6.6 Gerak *Brown*

Gerak ini terjadi pada partikel yang berukuran submikron ($d < 0,01\mu\text{m}$). 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

