

Evaluasi Partikel Pendar Droplet Minyak Silikon pada Diagnostik Medan Aliran Bergradien Kecepatan Tinggi

Harinaldi

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia
Kampus Baru UI Depok 16424
E-mail : harinald@eng.ui.ac.id

Abstrak

Droplet minyak silikon yang diumpankan ke dalam medan aliran bergradien kecepatan tinggi dievaluasi kemampuannya sebagai partikel pendar untuk teknik pengukuran kecepatan non-intrusive berbasis Laser Doppler dan teknik visualisasi aliran berbasis Laser Sheet. Droplet minyak silikon diperoleh dari susunan atomizer jenis fluida ganda (nebulizer) yang dengan pengaturan tekanan input dapat menghasilkan droplet minyak berukuran diameter kurang dari 10 μm dengan distribusi yang terpusat cukup seragam pada diameter 2 μm (diukur dengan teknik PDA). Medan aliran bergradien kecepatan tinggi berada di lapisan percampuran (mixing layer) pada kanal aliran berkontur tangga yang terhubung pada terowongan angin kecepatan rendah dengan loop terbuka. Evaluasi partikel pendar untuk diagnostik medan aliran bergradien kecepatan tinggi secara khusus bertujuan untuk mengetahui kemampuan droplet tersebut mengikuti dinamika aliran (tracking capability) yang terjadi dalam medan aliran dengan mempertimbangkan beberapa faktor yang meliputi tenggelamnya partikel (particle sink) oleh gaya gravitasi akibat perbedaan gravitasi jenis, slip kecepatan particle (particle slippage), efek sentrifugal, efek gaya lift dan kemampuan mengikuti osilasi medan aliran.

Kata kunci: diagnostik aliran, partikel pendar, tracking capability

1. Pendahuluan

Dalam penelitian-penelitian bidang mekanika fluida dewasa ini semakin meningkat kajian-kajian yang memusatkan perhatian langsung pada masalah-masalah aliran dimana karakteristik aliran tak tunak dan terseparasi (*unsteady and separated flow*) mendominasi medan aliran. Untuk meneliti medan aliran yang memiliki struktur dengan perubahan temporal dan spatial yang sangat cepat tersebut, metode diagnostik aliran yang akurat dibutuhkan untuk dapat mengakuisisi informasi tanpa mengganggu medan aliran itu sendiri [Kompenhans, 1997]. Dalam satu dasawarsa terakhir, diagnostik aliran dengan teknik-teknik pengukuran kecepatan (*velocimetry*) maupun visualisasi berbasis *laser sheet* semakin menjadi pilihan utama sebagai teknik *non-intrusive* pada aliran-aliran dengan struktur kompleks baik dalam kondisi isothermal maupun pada aliran reaktif. Diawali dengan teknik *Laser Doppler Anemometry (LDA)* pada akhir abad 20 dan diikuti dengan semakin besarnya daya laser yang dapat dibuat, teknik visualisasi berbasis *laser sheet* yang kemudian berkembang menjadi teknik pengukuran kecepatan citra partikel (*Particle Image Velocimetry/PIV*) akhirnya menjadi teknik diagnostik yang banyak digunakan untuk berbagai aplikasi mekanika fluida [Grant, 1997].

Metode-metode diagnostik berbasis laser tersebut sangat tergantung pada partikel-partikel pendar (*scattering particles*) yang tersuspensi dalam aliran sebagai pemberi informasi kecepatan dari medium kontinu (cairan atau gas). Keakuratan dalam menentukan kecepatan medan aliran sangat dibatasi oleh kemampuan partikel pendar dalam mengikuti gerakan sesaat dari medium kontinu tersebut. Oleh karena itu diperlukan kompromi antara upaya memperkecil ukuran partikel untuk meningkatkan kemampuan mengikuti aliran dengan memperbesar ukuran partikel untuk meningkatkan daya pendar cahaya [Melling dan Whitelaw, 1973]. Pengumpulan partikel pada aliran yang tepat merupakan hal yang sangat kritis dalam diagnostik berbasis laser. Meskipun dengan menggunakan laser berenergi besar, distribusi energi ini di seluruh *laser sheet* akan mengurangi kerapatan energinya. Demikian pula untuk menjamin didapatkannya informasi detail medan aliran yang memadai diperlukan konsentrasi spatial dari partikel yang cukup tinggi. Suatu pengumpulan partikel dengan ukuran yang seragam sangat diinginkan untuk menghindari

intensitas yang berlebihan dari partikel-partikel yang berukuran lebih besar dan *background noise* dari partikel-partikel yang lebih kecil yang mengurangi keakuratan.

Makalah ini mengevaluasi kemampuan droplet minyak silikon yang diproduksi dari susunan *twin-fluid atomizer (nebulizer)* dan diumpangkan ke dalam medan aliran bergradien kecepatan tinggi dalam lapisan percampuran (*mixing layer*) pada kanal aliran berkontur tangga yang terhubung pada terowongan angin kecepatan rendah dengan loop terbuka. Secara khusus pembahasan yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui kemampuan droplet tersebut mengikuti perilaku aerodinamika (*aerodynamic tracking capability*) yang terjadi dalam medan aliran dengan mempertimbangkan beberapa faktor yang meliputi gerak tenggelam partikel (*particle sink*) oleh gaya gravitasi akibat perbedaan gravitasi jenis, slip kecepatan partikel (*particle slippage*), efek sentrifugal, efek gaya lift dan kemampuan mengikuti osilasi medan aliran.

2. Tinjauan Teoritis

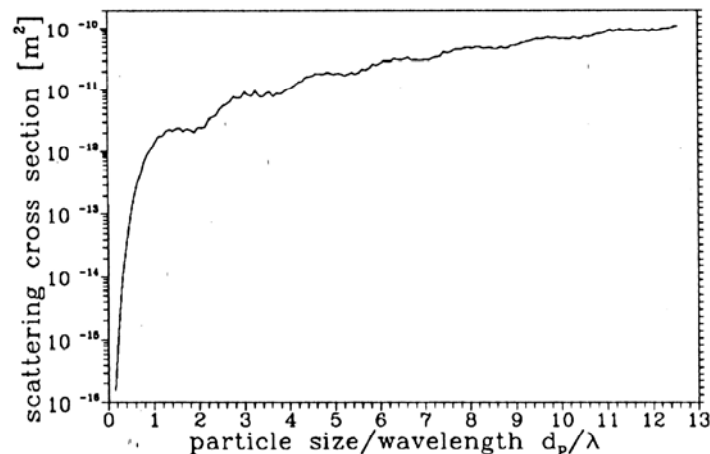
2.1 Karakteristik Pendar Partikel

Pemilihan diameter optimal dari partikel yang akan diumpangkan ke dalam aliran merupakan kompromi antara kemampuan respon aerodinamik partikel dalam fluida (yang lebih baik untuk diameter semakin kecil) dengan peningkatan *signal-to noise ratio (SNR)* yang membutuhkan diameter besar agar sinyal cahaya pendar meningkat. Meskipun kajian ini lebih memusatkan perhatian pada kemampuan partikel mengikuti aerodinamika aliran, namun tinjauan teoritis mengenai karakteristik pendar partikel akan diberikan secara ringkas berikut ini.

Ukuran yang mudah digunakan untuk menyatakan kemampuan memendarkan cahaya dari suatu partikel adalah penampang pendar (*scattering cross section*), C_s yang didefinisikan sebagai rasio dari daya yang dipendarkan total P_s terhadap intensitas laser I_0 yang mengenai partikel:

$$C_s = P_s/I_0 \quad (1)$$

Gambar 1 menunjukkan variasi C_s sebagai fungsi dari rasio antara diameter partikel terhadap panjang gelombang laser λ untuk partikel bulat dengan indeks bias $m = 1,6$ [Melling and Whitelaw, 1973].



Gambar 1. Variasi C_s sebagai fungsi dari rasio antara diameter partikel terhadap panjang gelombang laser λ untuk partikel bulat dengan indeks bias $m = 1,6$

Dalam berbagai pengukuran berbasis laser, biasanya pengamatan dilakukan terhadap cahaya pendar pada arah 90° terhadap lembar cahaya (*light sheet*) yang mengenai partikel. Dengan demikian tidak hanya distribusi angular intensitas cahaya pendar dari partikel pendar yang perlu diperhatikan, tetapi juga perpendaran dari seluruh penampang pendar. Kajian-kajian terhadap cahaya pendar dari partikel bulat menunjukkan bahwa rasio intensitas dari cahaya pendar pada arah 90° terhadap cahaya pendar arah depan 0° (*forward scattered*) I_{s90}/I_{s0}

merupakan fungsi yang sangat dipengaruhi oleh parameter ukuran partikel, d_p/λ dan indeks bias partikel m . Secara umum rasio I_{s90}/I_{s0} akan berkurang dengan meningkatnya nilai d_p/λ dengan kisaran nilai $10^{-1} - 10^{-3}$ untuk partikel yang biasa digunakan pada diagnostik berbasis laser seperti LDA, PIV dan lain-lain. Dengan demikian, intensitas dari cahaya pendar yang diperoleh untuk intensitas lembar cahaya tertentu akan sangat tergantung pada pengaruh kombinasi dari C_s dan I_{s90}/I_{s0} yang menunjukkan kecenderungan berlawanan dengan semakin besarnya ukuran partikel. Namun secara keseluruhan, partikel yang lebih besar akan memberikan sinyal yang lebih kuat.

2.2 Kemampuan Partikel Mengikuti Aliran (Aerodynamic Tracking Capability)

Jika pengaruh berbagai gaya luar (gravitasi, sentrifugal, dan elektrostatik) dapat diabaikan, maka kemampuan partikel yang tersuspensi di dalam fluida dipengaruhi hanya oleh bentuk partikel, diameter partikel d_p , kerapatan partikel ρ_p , kerapatan fluida ρ_f , viskositas dinamik fluida μ . Bentuk partikel yang dapat dianalisis gerakannya dengan lengkap adalah partikel bulat. Asumsi bentuk bulat ini valid untuk droplet kecil dan partikel padat dispersi tunggal. Untuk partikel dengan bentuk tak tentu, biasanya diasumsikan partikel tersebut dapat dianggap bulat dengan diameter ekuivalen secara aerodinamik. Konsentrasi partikel diasumsikan sangat rendah sedemikian hingga partikel-partikel tersuspensi di dalam fluida dengan volume sangat besar mencapai sampai $10^9/m^3$ seperti dispersi partikel dalam gas. Pada konsentrasi ini, partikel berukuran $1 \mu m$ mempunyai jarak pisah rata-rata 1000 kali diameternya.

Hukum Stokes mengenai gaya drag pada partikel bulat dapat diterapkan jika bilangan Reynolds partikel, Re_p lebih kecil dari satu. Kondisi ini dapat terpenuhi untuk partikel-partikel kecil dan kecepatan yang relatif kecil. Hukum Stokes memberikan perkiraan yang konvensional mengenai kemampuan partikel mengikuti aliran, karena gaya drag aktual cenderung lebih besar. Dengan asumsi yang dinyatakan di awal paragraf sebelumnya, persamaan Basset yang ditunjukkan oleh Persamaan (2) merupakan persamaan gerak tak tunak dari partikel bulat yang tersuspensi dalam fluida. Persamaan ini menghubungkan kecepatan relatif sesaat antara partikel dan fluida V dengan kecepatan sesaat partikel U_p dan kecepatan sesaat fluida U_f .

$$\frac{\pi d_p^3}{6} \rho_p \frac{dU_p}{dt} = -3\pi\mu d_p V + \frac{\pi d_p^3}{6} \rho_f \frac{dU_f}{dt} - \frac{1}{2} \frac{\pi d_p^3}{6} \rho_f \frac{dV}{dt} - \frac{3}{2} d_p^2 (\pi\mu\rho_f)^{1/2} \int_{t_0}^t \frac{dV}{d\xi} \frac{d\xi}{(t-\xi)^{1/2}} \quad (2)$$

Gaya akselerasi dan hambatan viskos menurut hukum Stokes diberikan oleh dua suku pertama. Percepatan fluida menyebabkan adanya gradien tekanan di sekitar partikel sehingga terdapat gaya tambahan yang ditunjukkan oleh suku ketiga. Suku keempat mewakili hambatan fluida inviscid terhadap percepatan partikel bulat, sebagaimana yang diturunkan dari teori potensial. Kombinasi suku pertama, ketiga dan keempat sama dengan gaya percepatan pada partikel bulat yang massanya meningkat sebesar tambahan mass 'semu' yang besarnya separuh dari massa fluida yang ditempati oleh partikel bulat. Suku terakhir adalah 'Basset history integral' yang menyatakan hambatan akibat ketak-tunakan medan aliran.

Meskipun persamaan (2) dapat diterapkan pada kebanyakan medan aliran, dalam kasus-kasus tertentu, gaya-gaya badan yang menimbulkan pengaruh-pengaruh tambahan tidak dapat diabaikan. Contohnya adalah pada aliran-aliran geser (*shear flow*) dimana akan timbul suatu gaya angkat (*lift force*) pada partikel yang tersuspensi akibat gradien kecepatan pada lapisan geser. Pada medan aliran yang juga dikarakterisasi oleh aliran pusar (*swirling flow*), gaya sentrifugal juga menjadi penting karena gaya ini akan mempercepat partikel secara radial keluar dari inti vorteks [Durst et al, 1981]. Efek-efek lain yang timbul meliputi gerak tenggelam partikel, kemampuan partikel mengikuti fluktuasi aliran terutama pada medan aliran turbulen merupakan hal yang tidak dapat diabaikan dalam pertimbangan penggunaan partikel pendar untuk diagnostik aliran pada medan aliran yang kompleks. Namun demikian sekalipun penyederhanaan melalui analisis partikel bulat bisa memberikan penyelesaian yang memadai melalui persamaan (2), untuk situasi sesungguhnya efek-efek lain tersebut hanya dapat ditentukan melalui relasi-relasi empiris seperti yang dibahas pada paragraf-paragraf berikut.

Gerak Tenggelam Partikel (Particle Sink)

Apabila sebuah partikel padat, droplet atau cairan kabut diumpangkan ke dalam aliran fluida, partikel tersebut akan mengalami gerak tenggelam oleh gaya gravitasi akibat perbedaan gravitasi jenis antara partikel dan fluida. Secara teoritis, hukum Stokes mengenai gaya drag dapat diterapkan pada hal tersebut. Berdasarkan hal tersebut, Asanuma [1986] menyatakan bahwa sebuah partikel tunggal dengan diameter, d_p , kurang dari 100 μm dan kerapatan ρ_p dalam aliran fluida dengan kerapatan ρ_f dan viskositas kinematik ν_f , akan mengalami gerak tenggelam dengan kecepatan U_s :

$$U_s = \frac{1}{18} \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} - 1 \right) g \left(\frac{d_p^2}{\nu_f} \right) \left(1 + \frac{2al}{d_p} \right) \quad (3)$$

dimana a konstanta Kaningam dan l lintasan bebas rata-rata molekul fluida.

Selanjutnya, kecepatan tenggelam untuk suatu kelompok partikel $U_{s,g}$, dipengaruhi oleh interferensi antar partikel. Dalam hal ini kecepatan tenggelam harus dikoreksi dengan konsentrasi volumetrik kelompok partikel (c) menurut hubungan berikut:

$$\frac{U_{s,g}}{U_s} = \left(\frac{(1-c)^3}{(6c + (1-c)^2)} \right) \quad (4)$$

Slip Partikel

Fisrtrom and Westenberg [1965] berdasarkan hukum Stokes mengenai gaya drag pada partikel bulat *particle* menyatakan bahwa slip partikel yang merupakan perbedaan kecepatan antara partikel dan fluida (Δv), dapat dihitung berdasarkan Persamaan (5)

$$\Delta v = \frac{1}{18} \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right) g \left(\frac{d_p^2}{\nu_f} \right) \quad (5)$$

Pengaruh Gaya Sentrifugal

Partikel yang diumpangkan ke dalam medan aliran yang memiliki kelengkungan dengan radius R akan mengalami gaya sentrifugal [Durst et al, 1981]. Gerakan partikel akan bergeser ke arah radial. Dalam hal ini kecepatan radial ($V_{p,r}$) dan pergeseran arah angular partikel (θ) karena gaya sentrifugal dapat ditentukan dengan Persamaan (6)

$$\tan \theta = \frac{V_{p,r}}{U_f} = \left(\frac{d_p^2}{18} \right) \left(\frac{1 - \frac{\rho_p}{\rho_f}}{\nu_f} \right) \left(\frac{U_f}{R} \right) \quad (6)$$

Pengaruh Gaya Lift

Saffman [1965] menyatakan bahwa sebuah partikel bulat kecil dalam medan aliran yang mempunyai gradien kecepatan tegak lurus dalam arah aliran akan mengalami gaya angkat (*lift*) karena aliran sirkulasi yang terbentuk di sekitar partikel dan akan bergerak tegak lurus terhadap arah aliran dengan kecepatan V_l menurut hubungan yang dinyatakan oleh Persamaan (7)

$$V_l = \left(\frac{27}{2\pi} \right) \left(\frac{d_p}{\nu^{1/2}} \right) \left(\frac{\partial U_f}{\partial y} \right)^{1/2} \Delta v \quad (7)$$

dimana Δv adalah slip partikel yang diperoleh dari Persamaan (5)

Kemampuan Partikel mengikuti Osilasi Medan Aliran

Partikel-partikel yang terdispersi dalam fluida pada medan aliran turbulente akan mempunyai kemampuan mengikuti osilasi medan aliran, yang tergantung pada rasio kerapatan dan ukuran partikel. Hjelmfelt dan Mockros [1966] menyatakan bahwa dalam medan aliran yang kecepatannya berosilasi dengan frekuensi f , maka kecepatan sebuah partikel bulat juga akan berosilasi dengan rasio amplitudo terhadap kecepatan aliran, A_v dan beda fase (*phase lag*) β seperti ditunjukkan persamaan (8) dan (9):

$$A_v = \sqrt{(1 + k_1)^2 + k_2^2} \quad (8)$$

$$\tan \beta = \left(\frac{k_2}{1 + k_1} \right) \quad (9)$$

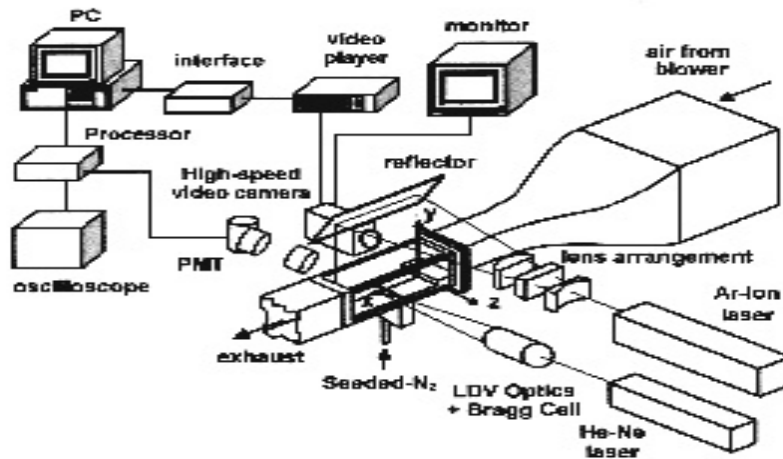
dimana :

$$k_1 = \frac{\left(1 + \left(\frac{9}{\sqrt{2}(\rho_p/\rho_f) + 0.5} \right) \left(\sqrt{\frac{v_f}{2\pi f d_p^2}} \right) \right) \left(\frac{1 - (\rho_p/\rho_f)}{(\rho_p/\rho_f) + 0.5} \right)}{\left(\frac{81}{(\rho_p/\rho_f) + 0.5} \right)^2 \left(2 \left(\frac{v_f}{2\pi f d_p^2} \right) + \frac{\sqrt{\frac{v_f}{2\pi f d_p^2}}}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left(1 + \left(\frac{9}{\sqrt{2}(\rho_p/\rho_f) + 0.5} \right) \left(\sqrt{\frac{v_f}{2\pi f d_p^2}} \right) \right)^2} \quad (10)$$

$$k_2 = \frac{\left(\frac{9(1 - (\rho_p/\rho_f))}{(\rho_p/\rho_f) + 0.5} \right) \left(2 \left(\frac{v_f}{2\pi f d_p^2} \right) + \frac{\sqrt{\frac{v_f}{2\pi f d_p^2}}}{\sqrt{2}} \right)}{\left(\frac{81}{(\rho_p/\rho_f) + 0.5} \right)^2 \left(2 \left(\frac{v_f}{2\pi f d_p^2} \right) + \frac{\sqrt{\frac{v_f}{2\pi f d_p^2}}}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left(1 + \left(\frac{9}{\sqrt{2}(\rho_p/\rho_f) + 0.5} \right) \left(\sqrt{\frac{v_f}{2\pi f d_p^2}} \right) \right)^2} \quad (11)$$

3. Metode Eksperimental

Penelitian dilakukan dalam suatu terowongan angin kecepatan rendah loop terbuka dengan *set-up* eksperimental seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2. Penjelasan rinci dari peralatan eksperimen dan instrumentasi untuk diagnostik aliran dengan *Laser Doppler Anemometry (LDA)* dan *laser sheet based visualization* dapat ditemukan pada publikasi terdahulu [Harinaldi, 2002]. Modifikasi dilakukan hanya pada posisi pengumpanan partikel pendar yang dilakukan pada nosel kontraksi di hulu aliran sehingga memasuki seksi uji berupa kanal aliran berkontur tangga, partikel pendar sudah terdispersi secara merata di dalam udara yang mengalir. Medan aliran bergradien tinggi terbentuk lapisan percampuran (*mixing layer*) yang didominasi oleh aliran geser (*shear flow*) dan juga dikarakteristikan oleh pembentukan struktur koheren skala besar.



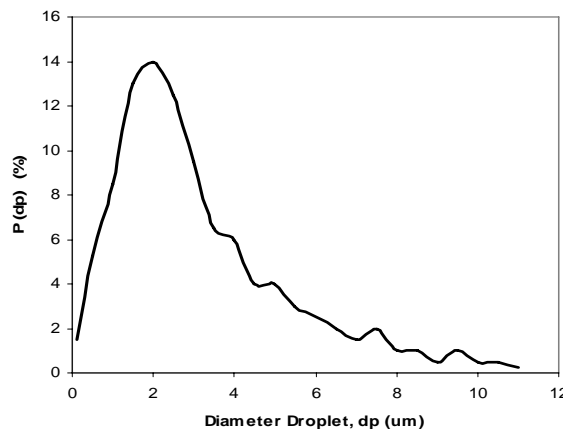
Gambar 2 Susunan Peralatan Eksperimen

Untuk menghasilkan partikel pendar yang diumpankan ke dalam medan aliran, eksperimen ini menggunakan atomizer jenis *twin-fluid (nebulizer)* yang banyak digunakan di bidang medis (Inspiron model 002305-A). Dengan menggunakan susunan 8 buah atomizer tersebut minyak dimetil silikon (Toshiba Silicon, TSF 451-50), yang memiliki kerapatan $\rho_f = 0.91265 \text{ g/ml}$, viskositas kinematik $\nu_f = 50 \text{ mm}^2/\text{s}$, dan titik didih sekitar $300 \text{ }^\circ\text{C}$ diubah menjadi droplet minyak berbentuk bulat dan berfungsi sebagai partikel pendar yang diumpankan ke dalam medan aliran. Meskipun susunan atomizer tersebut disiapkan sebanyak 8 buah, jumlah atomizer yang aktif diatur dengan mempertimbangkan pengaturan tekanan input dengan tujuan didapatkannya pengumpanan partikel yang konstan. Sebelum digunakan dalam eksperimen, ukuran partikel dan distribusinya terlebih dahulu ditentukan dengan metode phase Doppler particle sizing technique dengan mengikuti prosedur dari Ueda et al. [1991]. Sebagai pembandingan hasil pengukuran kecepatan pada medan aliran di lapisan percampuran, dilakukan juga pengukuran kecepatan aliran dengan menggunakan metode kawat panas/*hot wire anemometry probe* tunggal. Pengukuran dilakukan dengan kondisi kecepatan aliran bebas, $U_0 = 10 \text{ m/s}$ dan tinggi tangga, $H = 20 \text{ mm}$ dengan posisi pengukuran searah aliran $x/H = 1 - 6$.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Partikel Pendar Droplet Minyak Silikon yang Dihasilkan

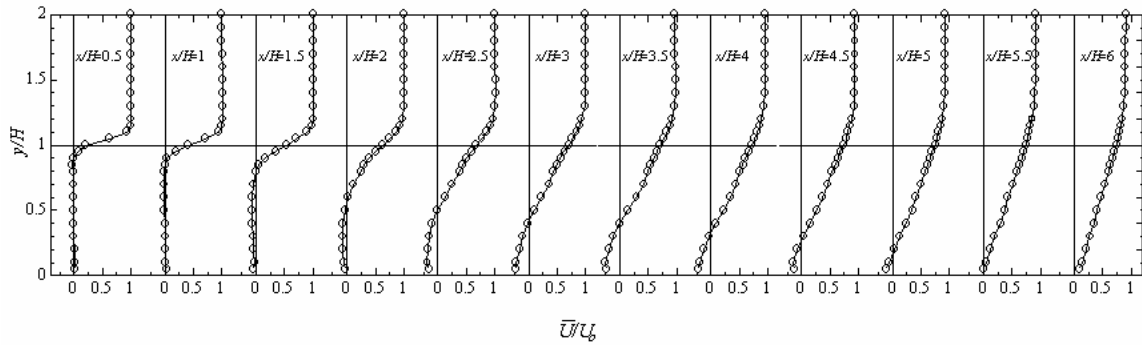
Dengan mengatur tekanan input pada atomizer diperoleh droplet minyak silikon dengan dengan ukuran diameter sampai $10 \text{ }\mu\text{m}$ dengan mayoritas terdistribusi secara cukup seragam dengan ukuran $2 \text{ }\mu\text{m}$ and kerapatan jumlahnya (konsentrasi) sekitar $400 \text{ partikel/cm}^3$ pada at the sisi keluar nozzle. Dengan demikian konsentrasi volumetrik dari grup droplet yang dihasilkan adalah sebesar $c = 7,07 \times 10^{-10}$. Gambar 3 menunjukkan fungsi kepadatan probabilitas (*pdf*) dari sebaran ukuran droplet yang diperoleh.



Gambar 3 Fungsi kepadatan probabilitas (pdf) dari sebaran diameter droplet (dp)

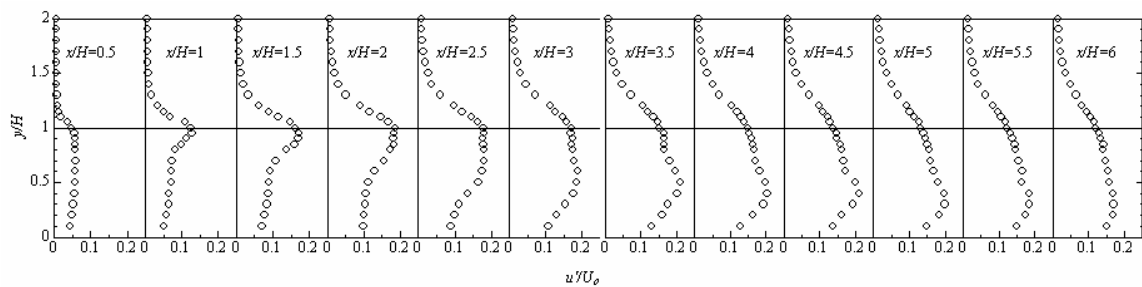
4.2 Profil Kecepatan dan Intensitas Turbulen Medan Aliran Lapisan Percampuran

Gambar 4 menunjukkan profil komponen kecepatan searah aliran pada lokasi $x/H = 0,5 \sim 6$, baik yang diperoleh dengan *hot-wire anemometry* maupun dengan *laser doppler anemometry*. Hasil kedua pengukuran tersebut memberikan distribusi kecepatan yang relatif tidak menunjukkan perbedaan yang berarti. Profil kecepatan tersebut menunjukkan bahwa di daerah lapisan geser, gradien kecepatan pada setiap lokasi searah aliran tetap mempunyai nilai yang tinggi dengan nilai sekitar 3000 s^{-1} . Semakin ke arah hilir gradien kecepatan di lapisan geser ini cenderung berkurang.



Gambar 4 Profil komponen kecepatan searah aliran ($U_0 = 10 \text{ m/s}$; $H = 20 \text{ mm}$; $z = 0 \text{ mm}$; o = LDA; -- = HWA)

Gambar 5 menunjukkan profil intensitas turbulen pada lokasi searah aliran yang bersesuaian ($x/H = 0.5 \sim 6$). Pada setiap lokasi, profil tersebut menunjukkan bahwa intensitas turbulen mempunyai nilai maksimum di lapisan geser, dan kemudian berkurang di daerah resirkulasi. Namun demikian tingkat intensitas turbulen di daerah resirkulasi masih lebih besar dibandingkan dengan di daerah aliran bebasnya. Semakin ke hilir, dengan berkembangnya lapisan geser, daerah yang mempunyai tingkat intensitas turbulen tinggi juga membesar. Khususnya mulai dari $x/H = 3.5$ sampai $x/H = 5$, profil tersebut menunjukkan daerah yang cukup luas yang memiliki distribusi turbulen yang seragam dengan intensitas yang tinggi.

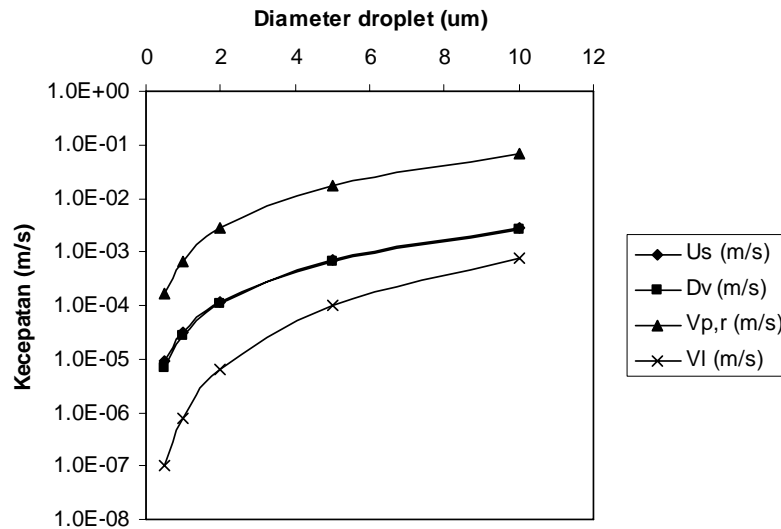


Gambar 5 Profil Intensitas Turbulen ($U_0 = 10 \text{ m/s}$; $H = 20 \text{ mm}$; $z = 0 \text{ mm}$)

4.3 Kemampuan Droplet Minyak Silikon Mengikuti Aliran

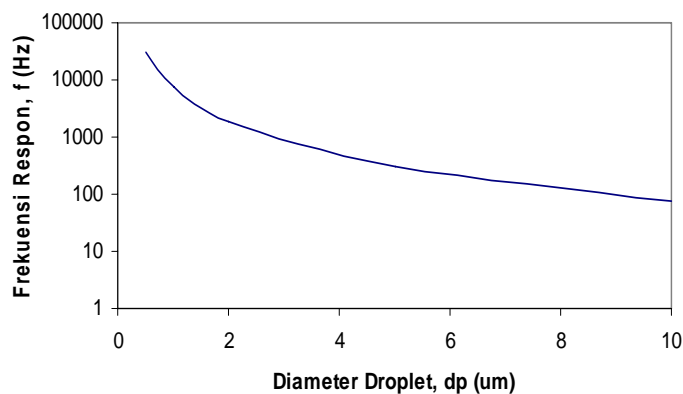
Gambar 6 menunjukkan faktor-faktor yang mempengaruhi kemampuan droplet minyak silikon dalam mengikuti aliran (*aerodynamic tracking capability*). Pada gambar ditunjukkan besarnya kecepatan gerak tenggelam (sink velocity) U_s , selip partikel Δv , kecepatan radial akibat pengaruh gaya sentrifugal, $V_{p,r}$ dan kecepatan gerak lift akibat pengaruh gaya lift, V_l untuk seluruh ukuran diameter droplet yang dihasilkan. ($0,5 \sim 10 \mu\text{m}$). Kecepatan radial akibat dari gaya sentrifugal diperoleh di daerah lapisan geser yang mempunyai radius kelengkungan tipikal dari garis arus sekitar $0,1 \text{ m}$ dan kecepatan lokal separuh dari aliran bebasnya, $U_f = 5 \text{ m/s}$. Kecepatan lift akibat pengaruh gaya lift yang timbul diperoleh di daerah lapisan geser yang mempunyai gradien kecepatan tipikal sekitar 3000 s^{-1} . Dari gambar tersebut terlihat bahwa dalam medan aliran yang diteliti, penyimpangan arah radial dari kecepatan droplet akibat medan aliran

yang memiliki jari-jari kelengkungan bernilai paling besar diikuti oleh kecepatan gerak tenggelam dan kecepatan lift. Sedangkan slip partikel besarnya kurang lebih sama dengan kecepatan gerak tenggelam. Untuk ukuran diameter partikel $d_p = 2 \mu\text{m}$ yang merupakan mayoritas pada distribusi diameter droplet yang dihasilkan slip partikel (perbedaan kecepatan antara partikel dengan kecepatan fluida), kecepatan gerak tenggelam partikel akibat gaya gravitasi dan perbedaan gravitasi jenis kurang dari 0,15 mm/s, sedangkan kecepatan lift sekitar 0,01 mm/s.



Gambar 6 Kecepatan tenggelam (U_s), slip kecepatan (Δs), kecepatan radial ($V_{p,r}$) dan kecepatan lift (V_l) dari droplet minyak silikon pada berbagai diameter droplet.

Gambar 7 menunjukkan batas atas dari frekuensi osilasi kecepatan aliran yang masih dapat diikuti oleh osilasi partikel serta dengan rasio amplitudo tidak kurang dari 99 %. Bada fase osilasi untuk seluruh kisaran diameter partikel sekitar -0,124 rad.



Gambar 7 Batas atas dari frekuensi osilasi kecepatan aliran yang masih dapat diikuti oleh osilasi partikel dengan rasio amplitudo > 99%

5. Kesimpulan

Kemampuan partikel pendar droplet minyak silikon untuk mengikuti aerodinamika aliran telah dievaluasi dengan mempertimbangkan faktor-faktor yang mempengaruhi bukan hanya berdasarkan analisis teoritis tetapi juga berdasarkan rekomendasi-rekomendasi empiris yang disampaikan oleh referensi-referensi terdahulu. Hasilnya menunjukkan bahwa untuk diameter partikel $d_p = 2 \mu\text{m}$ yang merupakan mayoritas pada distribusi diameter droplet yang dihasilkan slip partikel (perbedaan kecepatan antara partikel dengan kecepatan fluida), kecepatan gerak

tenggelam partikel akibat gaya gravitasi dan perbedaan gravitasi jenis kurang dari 0,15 mm/s. Pengaruh gaya lift yang dialami partikel akibat aliran sirkulasi yang terbentuk di sekitar aliran kurang dari 0,01 mm/s. Sedangkan terhadap fluktuasi aliran partikel pendar droplet minyak silikon dapat merespon osilasi dengan rasio kecepatan tidak kurang dari 99% sampai frekuensi tidak kurang dari 1800 Hz. Secara keseluruhan partikel pendar minyak silikon yang diteliti mempunyai kemampuan mengikuti aerodinamika aliran yang memadai meskipun diumpankan dalam medan aliran bergradien tinggi dengan tingkat intensitas turbulen yang cukup besar.

6. Daftar Pustaka

- Asanuma T, 1986, Handbook of Flow Visualization, New Ed. (in Japanese: *Nagare no Kasika Handobuku*), Asakura Shoten, Tokyo
- Durst F, Melling A and Whitelaw J H, 1981 *Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry*, Academic, London
- Firstrom R M and Westenberg A A, 1965, *Flame Structure*, McGraw-Hill, New York
- Grant I, 1997, Particle Image Velocimetry: a review. *Proc. Inst. Mech. Eng.*, Vol. C, No. 211, hal. 55-76
- Harinaldi, Ueda T and Mizomoto M, 2002, Non-reactive Mixing in Recirculation Flow behind a Backward-facing step, *Int. Symp. of Transport Phenomena*, Victoria, Canada
- Hjelmfelt J, Mockros L F, 1966, Motion of discrete particles in a turbulent fluid, *Applied Science Res.*, Vol. 16, hal. 149
- Kompenhans J and Tropea C, 1997, Editorial, *Measurement Science and Technology*, Vol. 8 No. 12, hal. 1378
- Melling A and Whitelaw J H, 1973, Seeding of gas flow for laser anemometry, *DISA Information*, Vol. 15, pp. 5-14
- Saffman PG, 1965, The lift on a small sphere in a slow shear flow, *J. Fluid Mechanics*, Vol. 22 hal. 385-400
- Ueda T, Yahagi Y and Mizomoto M, 1991, Mie Scattering with silicon oil droplets in combustion field, *Trans. JSME* (in Japanese), Vol. 57, No. 541-B, hal. 3255-3259