

# ANGKA KONVEKSI TERMAL ALIRAN FLUIDISI PADA TABUNG HORIZONTAL DAN ANGKA REYNOLDS RENDAH

Pawito M. Sontowiro

Laboratorium Energi Termal, Jurusan Teknik Mesin  
Institut Teknologi Bandung

## Abstrak

Unggun fluidisi merupakan lapisan suspensi partikel-partikel padat pada aliran gas. Perpindahan kalor yang terjadi antara permukaan yang terbenam pada unggun fluidisi dengan suspensi merupakan gejala yang sangat majemuk. Selain dipengaruhi oleh peubah-peubah seperti yang terdapat pada perpindahan kalor konveksi biasa, besarnya angka konveksi termal rata-rata masih dipengaruhi oleh sifat geometrik dan fisik partikel padat. Salah satu peubah yang menentukan besarnya angka konveksi termal adalah derajat keronggaan (*voidage*). Pada tulisan ini akan dikaji pengaruh derajat keronggaan terhadap angka konveksi termal fluidisi untuk angka Reynolds rendah.

## Abstract

A fluidized bed is a bed comprises a mixture of solid particles suspension in stream of gas. The heat transfer phenomenon between the surface of immersed body to/from fluidized bed is very complicated mechanism. Aside from the governing variables on conventional convective heat transfer, the rate of heat transfer coefficient in fluidized bed, is also influenced by physical and geometrical properties of solid particle. One of the variables which governs the value of thermal convective heat transfer coefficient is *voidage*. The influence of *voidage* on thermal convective heat transfer coefficient at low Reynolds number will be reported on this paper.

## 1. PENDAHULUAN

Aliran fluidisi gas-padat adalah suatu gejala mengalirnya gas melewati unggun yang terbentuk dari campuran suspensi antara gas dengan partikel-partikel padat. Unggun tersebut mempunyai kelakuan seperti zat cair, misalnya permukaan bebasnya selalu horisontal dan tekanan statik pada suatu titik sebanding dengan ketinggian titik tersebut. Bila pada suatu unggun partikel, dialirkan gas dengan arah vertikal dan laju aliran selalu ditingkatkan mulai dari nol, maka pada suatu harga tertentu, unggun mulai bergerak dan tebal unggun sedikit bertambah kemudian tetap. Pada keadaan tersebut unggun dikatakan berada pada awal fluidisi. Kecepatan semu aliran gas pada keadaan tersebut, yaitu kecepatan gas bila seandainya didalam saluran fluidisi tidak ada partikel, dinamakan kecepatan awal fluidisi ( $U_{mf}$ ). Bila laju aliran ditingkatkan lebih lanjut, unggun fluidisi akan mengembang (bertambah tinggi) dan pada suatu harga tertentu, partikel-partikel mulai terbawa oleh aliran gas. Gejala pada keadaan tersebut dinamakan aliran fluidisi akhir atau awal aliran pneumatik. Kecepatan semu gas pada keadaan yang bersangkutan dinamakan kecepatan akhir atau kecepatan terminal ( $U_t$ ). Pada kecepatan aliran yang lebih rendah dari pada  $U_{mf}$ , aliran dinamakan aliran pada unggun tetap (*fixed-bed*). Pada aliran fluidisi, didalam unggun terbentuk

gelembung-gelembung gas. Bagian yang diluar gelembung dinamakan emulsi. Fraksi volume yang ditempati oleh gelembung-gelembung gas terhadap volume total dinamakan *voidage* ( $\delta$ ). Fraksi volume yang ditempati gas didalam emulsi dinamakan porositas ( $\epsilon_c$ ).

Dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan, pada kecepatan alir yang sama, pustaka 1 menyatakan bahwa angka konveksi termal aliran fluidisi dapat mencapai puluhan kali lebih besar dari pada aliran konveksi paksa konvensional.

Selain dipengaruhi oleh peubah-peubah seperti pada gejala konveksi termal konvensional, angka konveksi termal pada unggun fluidisi juga masih dipengaruhi oleh sifat-sifat geometrik dan fisik partikel-partikel fluidisi. Sifat geometrik partikel, selain ditentukan oleh ukuran juga ditentukan oleh derajat kebolaan ( $\psi$ ) partikel yang bersangkutan. Secara umum, angka Nusselt pada unggun fluidisi dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$N_u = F \left\{ c_{pg}\mu_g/k_g, D_p U \rho_g / \mu_g, \rho_s / \rho_g, c_s / c_g, k_s / k_g, L_b / D_p, D_t / D_p, U / U_{mf}, \epsilon / \epsilon_{mf}, \psi \right\}$$

Dengan memberlakukan idealisasi pada masalah yang dihadapi, jumlah peubah menjadi berkurang.

## 2. ANGKA KONVEKSI TERMAL

Untuk partikel dan posisi yang sudah tertentu, selain dipengaruhi oleh angka Reynolds, angka konveksi termal fluidisi masih dipengaruhi oleh angka Prandtl gas dan porositas total unggun. Untuk beberapa gas, perubahan angka Prandtl terhadap temperatur tidak begitu kuat, sehingga pada rentang temperatur yang tidak terlalu lebar, angka Prandtl gas yang bersangkutan dapat dianggap tetap. Dalam bentuk tidak bersatuan, porositas total dinyatakan dalam bentuk perbandingan padat-gas ( $R_{sg}$ ) sebagai berikut

$$R_{sg} = (\rho_s / \rho_g)(1 - \varepsilon) / \varepsilon \quad (1)$$

Dengan batasan-batasan yang telah disebutkan, angka konveksi termal fluidisi dapat dinyatakan sebagai berikut

$$N_u = F(R_e, R_{sg}) \quad (2)$$

$$R_e = \rho_g D_t U / \mu_g \quad (3)$$

Porositas total unggun sangat dipengaruhi *voidage* ( $\delta$ ) dan porositas emulsi ( $\varepsilon_e$ ).

$$\varepsilon = \delta \varepsilon_b + (1 - \delta) \varepsilon_{mf}$$

Pada emulsi, porositas unggun tidak jauh berbeda dengan porositas unggun pada kondisi awal fluidisi ( $\varepsilon_e = \varepsilon_{mf}$ ). Bila didalam gelembung dianggap tidak ada awan butiran, maka porositas gelembung,  $\varepsilon_b$ , sama dengan 1, maka

$$\varepsilon = \delta + (1 - \delta) \varepsilon_{mf} \quad (4)$$

Dengan mengambil model Davidson, yang menganggap gelembung seperti bola dan aliran emulsi terhadap gelembung dianggap irrotasional (pustaka 1), porositas total dapat dihitung dengan langkah berikut. Frekuensi gelembung, dihitung dengan persamaan empirik

$$n = 54,8 / vol^{0,2} \quad (5)$$

$$vol = Vol / z$$

Lambang z menyatakan jumlah orifis dan bila frekuensi gelembung lebih dari 21, maka diambil 21 (pustaka 1). Diameter gelembung dapat dicari dengan persamaan

$$D_b = \{(6/3,14)(vol/n)\}^{1/3} \quad (6)$$

Kecepatan relatif gelembung terhadap emulsi dihitung dengan persamaan empirik sebagai berikut

$$U_{br} = 0,711(g D_b)^{0,5} \quad (7)$$

Kecepatan mutlak gelembung

$$U_b = (U - U_{mf}) + U_{br} \quad (8)$$

$U_{mf}$  didapat dari pengujian. Bila  $U_b$  telah didapat, *voidage* dihitung sebagai berikut:

$$\delta = (U - U_{mf}) / (U_b + 2U_{mf}) \quad (9)$$

Dengan telah diketahuinya *voidage* porositas total dapat dihitung dengan persamaan (4). Angka konveksi termal rata-rata fluidisi dihitung sebagai berikut

$$h = \dot{Q} / [S_t (T_t - T_b)] \quad (10)$$

$$N_u = h D_t / k_g \quad (11)$$

## 3. PENGUJIAN

Alat uji berupa tabung tembaga dengan pemanas listrik didalamnya dan dibenamkan pada unggun fluidisi pada jarak 31 mm dari pelat orifis (gambar 1). Gas yang digunakan adalah udara. Unggun fluidisi terdiri dari partikel alumina yang dirumahi oleh tabung fluidisi tembus pandang.

Spesifikasi komponen utama alat uji adalah sebagai berikut:

Tabung pemanas

bahan	: tembaga
$D_t$	: 12,7 mm
$L_t$	: 40 mm
$S_t$	: 1596 mm <sup>2</sup>

(ujung terisolasi termal)

Partikel

bahan	: alumina (partikel)
$D_{p\text{ rata2}}$	: 250 $\mu$ m
$D_{p\text{ min}}/D_{p\text{ maks}}$	: 177/380 $\mu$ m
$\rho_s$	: 3770 kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{\text{ruang}}$	: 1670 kg/m <sup>3</sup>

Unggun fluidisi:

$L_o$	: 83 mm
-------	---------

Orifis

bahan	: aluminium
$D_{or}$	: 1 mm
susunan	: segaris
jarak orifis	: 5/5 mm
jumlah	: 346 lubang

Tabung fluidisi

bahan	: kaca
$D_b$	: 105 mm
tinggi	: 220 mm

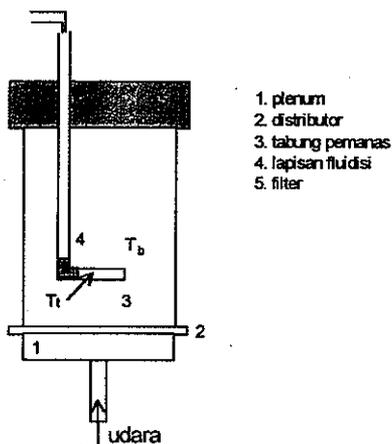
Laju aliran udara (*Vol*) diatur dengan regulator dari 0 sampai 100 l/menit. Pengamatan diawali dengan uji penurunan tekanan unggun untuk mencari kondisi awal fluidisi (minimum) dan akhir fluidisi (terminal). Dari pengamatan didapat  $U_{mf} = 9,56$  cm/s,  $L_{mf} = 83,5$  mm. Porositas fluidisi minimum dicari dari persamaan Ergun sebagai berikut

$$150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \mu \frac{U_{mf}}{D_{ev}^2} + 1,75 \frac{U_{mf}^2}{\varepsilon_{mf}^3} = g(\rho_s - \rho_g) \quad (12)$$

Dengan metoda Newton-Rapson didapat  $\epsilon_{mf} = 0,486$ .  
 Dari persamaan (5) dapat dinyatakan

$$D_b = \left\{ (6/3,14) (Vol_{kor} / z \pi) \right\}^{1/3} \quad (13)$$

$Vol_{kor}$  adalah laju aliran terkoreksi karena adanya perbedaan temperatur antara udara ruangan dan unggun fluidisi. Perhitungan frekuensi gelembung (persamaan 5) memberikan hasil diatas 21 maka frekuensi gelembung sama dengan 21.



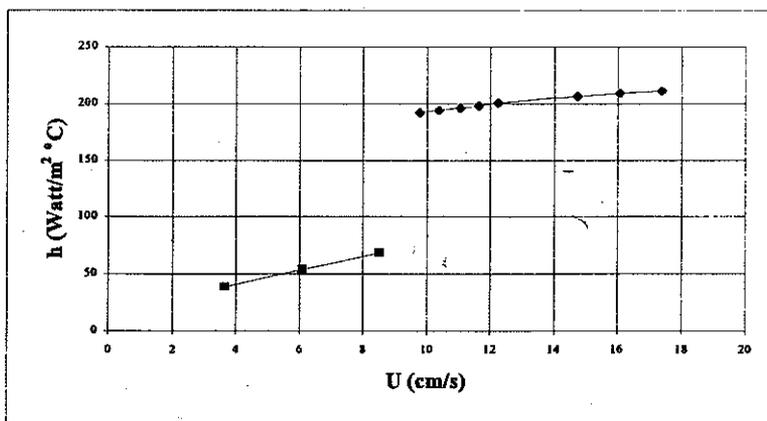
Gambar 1. Perangkat uji

#### 4. HASIL PENGUJIAN DAN BAHASAN

Harga angka konveksi termal fluidisi sebagai fungsi kecepatan semu dinyatakan pada gambar 2. Pengamatan hanya dilakukan pada daerah fluidisi penuh. Dari hasil perhitungan dilakukan regresi peubah-peubah  $R_c$  dan  $R_{sg}$  terhadap  $N_u$  dan hasilnya adalah persamaan sebagai berikut:

$$N_u = 0,23 R_c^{0,474} R_{sg}^{0,483}$$

untuk angka Reynolds dibawah 140. Hubungan antara  $N_u$  dan  $R_{sg}$  untuk beberapa angka Reynolds dicantumkan pada gambar 3.



Gambar 2. Angka konveksi termal sebagai fungsi kecepatan semu

Dari hasil pengujian besarnya angka konveksi termal ( $h = N_u k_g / D_t$ ) pada daerah fluidisi penuh, harganya semakin meningkat dengan meningkatnya  $R_{sg}$  dan  $R_c$ . Dengan semakin meningkatnya  $R_{sg}$ , porositas turun, intensitas sentuhan (jumlah sentuhan partikel dengan tabung per satuan luas per satuan waktu) semakin meningkat. Semakin meningkatnya intensitas sentuhan, fraksi luas permukaan tabung yang mempunyai unggun batas termal tipis semakin meningkat. Hal tersebut menjelaskan harga angka konveksi termal rata-rata meningkat.

#### 5. KESIMPULAN

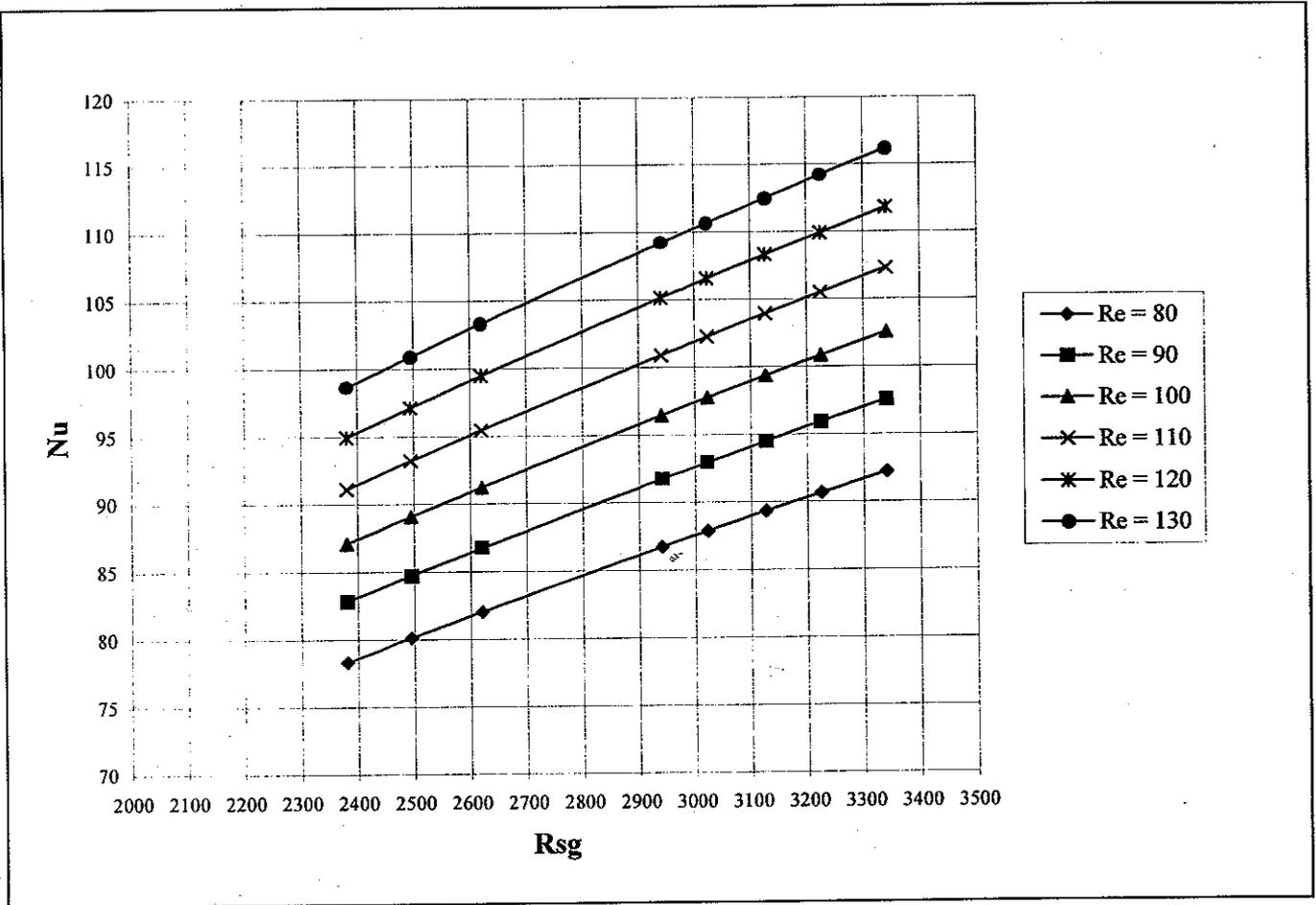
Dari pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa angka konveksi termal unggun fluidisi, selain dipengaruhi oleh besarnya angka Reynolds juga dipengaruhi oleh besarnya angka perbandingan antara massa partikel dan gas didalam unggun. Pengujian menunjukkan bahwa angka konveksi termal unggun fluidisi, harganya meningkat dengan semakin bertambah besarnya angka perbandingan antara massa partikel dan gas. Dari regresi data pengujian yang dilakukan, besarnya angka konveksi termal unggun fluidisi sebanding dengan angka perbandingan massa partikel dan gas pangkat 0,483.

#### 6. DAFTAR NOTASI

- A : luas penampang tabung fluidisi (cm<sup>2</sup>)
- $D_b$  : diameter gelembung udara (cm)
- $D_p$  : diameter partikel ( $\mu_m$ )
- $D_{ev}$  : diameter ekuivalen, sama dengan  $\psi D_p$  ( $\mu_m$ )
- $D_t$  : diameter tabung pemanas (mm)
- $L_{mf}$  : tinggi unggun fluidisi pada keadaan awal fluidisi (mm)
- $L_o$  : tinggi unggun fluidisi tanpa aliran gas (mm)
- $N_u$  : angka Nusselt (-)
- $\dot{Q}$  : laju perpindahan kalor (W)
- $R_c$  : angka Reynolds (-)
- $R_{sg}$  : perbandingan massa partikel terhadap gas (-)
- $S_t$  : luas permukaan tabung pemanas (mm<sup>2</sup>)
- $T_t$  : temperatur permukaan pemanas (°C)

$T_b$  : temperatur badan unggun ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $U$  : kecepatan semu gas (cm/s), sama dengan  $Vol_{kor}/A_b$   
 $U_{kor}$  : kecepatan semu gas terkoreksi (cm/s)  
 $U_b$  : kecepatan gelembung (cm/s)  
 $U_{mf}$  : kecepatan gas pada awal fluidisi (cm/s)  
 $U_{br}$  : kecepatan relatif gelembung terhadap emulsi (cm/s)  
 $Vol$  : laju aliran volume udara ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ), (l/s)  
 $Vol_{kor}$  : laju aliran volume terkoreksi udara ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ), (l/s)  
 $c_{pg}$  : panas jenis tekanan tetap gas ( $\text{J}/\text{kg } ^{\circ}\text{C}$ )  
 $c_s$  : panas jenis partikel ( $\text{J}/\text{kg } ^{\circ}\text{C}$ )

$\delta$  : voidage, fraksi volume gelembung pada unggun fluidisi (-)  
 $\epsilon$  : porositas total, fraksi volume gas pada unggun fluidisi (-)  
 $\epsilon_e$  : porositas emulsi (-)  
 $\epsilon_{mf}$  : porositas unggun fluidisi pada fluidisi awal (-)  
 $\psi$  : derajat kebulatan, perbandingan luas permukaan bola yang volumenya sama dengan volume partikel terhadap luas permukaan partikel (-)  
 $\mu_g$  : kekentalan gas ( $\text{N}/\text{m}^2$ )  
 $\rho_g$  : massa jenis gas ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $\rho_s$  : massa jenis partikel ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )



Gambar 3. Hubungan  $N_u$  dengan  $R_{sg}$

## 7. DAFTAR PUSTAKA

$g$  : percepatan gravitasi bumi (cm/s)  
 $h$  : angka konveksi termal rata-rata ( $\text{W}/\text{m}^2\text{ } ^{\circ}\text{C}$ )  
 $k_g$  : angka konduksi termal gas ( $\text{W}/\text{m } ^{\circ}\text{C}$ )  
 $k_s$  : angka konduksi termal partikel ( $\text{W}/\text{m } ^{\circ}\text{C}$ )  
 $n$  : frekuensi gelembung (l/s)  
 $vol$  : laju aliran volume udara per orifis ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )  
 $z$  : jumlah lubang orifis (-)

1. Daizo Kunii, Octave Levenspiel, "Fluidization Engineering", Robert E. Krieger Publishing Co., New York, 1977.
2. Dalel Keairns, "Fluidization Technology, Proceeding of the International Fluidization Conference", Pacific Grove Ca., 1975.
3. W.F. Podolski et al., "Pressurized Fluidized Bed", Noyes Data Co., New Jersey, 1983.