

## VISUALIZATION OF AIRFLOW FROM SPACE HEATERS WITH TURBULENT MODELS

### VISUALISASI ALIRAN UDARA DARI PEMANAS RUANGAN DENGAN MODEL TURBULEN

Gunarjo Suryanto Budi

Dosen Program Studi Pendidikan Fisika FKIP, Universitas Palangka Raya  
Jl. H.Timang Tunjung Nyaho Palangkaraya Kode Pos 73112

Email:gunarjosbudi@gmail.com

#### ABSTRACT

This article reports the results of research on the application of the turbulent model to fluid flow in cavities. This turbulent model was developed using the turbulent kinetic energy equation  $k$ , dissipation  $\epsilon$  and temperature variance  $\theta^2$  and applying the damping function  $f$ . While the equations about the tensor of stress and the vector of heat flux are formulated algebraically. This simulation is carried out at the Rayleigh number  $Ra = 5 \times 10^{10}$ . This turbulent model is applied to a three-dimensional cavity in the form of a cube and a room with a ratio of 1:2:3. The results were validated using experimental results and Direct Numerical Simulation (DNS) numerical data. Validation of the simulation results shows that the model can predict fluid flow relatively according to the DNS and experimental results. Besides that, this model is relatively simple, easy to use, the grid size is quite applicable for simulation, it is quite stable and the convergence time is relatively fast. From the simulation results it can be concluded that this turbulent model can be easily and fairly accurately applied to indoor airflow.

**Key words:** *Model turbulen, Reynolds stress, heat flux, convection*

#### ABSTRAK

Artikel ini melaporkan hasil penelitian tentang penerapan model turbulen pada aliran fluida pada cavity. Model turbulen ini dikembangkan dengan menggunakan persamaan energi kinetik turbulen  $k$ , disipasi  $\epsilon$  dan varian suhu  $\theta^2$  serta mengaplikasikan damping function  $f$ . Sedangkan persamaan tentang tensor dari stress dan vektor dari heat flux dirumuskan secara aljabar. Simulasi ini dilakukan pada bilangan Rayleigh  $Ra = 5 \times 10^{10}$ . Model turbulen ini diaplikasikan pada cavity tiga dimensi yang berupa kubus dan ruangan dengan ratio 1:2:3. Hasilnya divalidasi menggunakan hasil eksperimen dan data numerik Direct Numerical Simulation (DNS). Validasi terhadap hasil simulasi menunjukkan bahwa model dapat memprediksi aliran fluida dengan relatif sesuai dengan hasil DNS maupun eksperimen. Disamping itu, model ini relatif sederhana, mudah digunakan, ukuran grid yang cukup aplikatif untuk simulasi, cukup stabil dan waktu konvergensi yang relatif cepat. Dari hasil simulasi ini dapat disimpulkan bahwa model turbulen ini bisa dengan mudah dan cukup akurat diaplikasikan pada aliran udara dalam ruangan.

**Kata Kunci :** *Model turbulen, tekanan Reynolds, fluks panas, konveksi*

#### PENDAHULUAN

Penelitian di bidang dinamika fluida dapat dilakukan melalui eksperimen, studi literatur dan simulasi menggunakan computer. Kemajuan teknologi komputasi telah mendorong peneliti untuk mempelajari turbulensi dengan pemodelan, seperti yang dilakukan oleh Gunarjo 2009, Patel *et al.* 1985, Kenjeres 2003. Dol *et al* mengembangkan model turbulen pada tunnel vertikal menggunakan pendekatan second moment closure dan hasilnya cukup akurat, namun model matematikanya terhitung kompleks dan memerlukan waktu simulasi yang relative lama. (Kenjeres et al 2002) telah melakukan pemodelan turbulen menggunakan pendekatan Large Eddy Simulation namun hasilnya cukup baik seperti yang dilakukan oleh Dol *et al.* Hanjalic and Launder 1976 menggunakan fungsi khusus dan konstanta perubah yang selalu disesuaikan dengan jenis turbelen yang

diselidiki. Konstanta yang bernilai sesuai kondisi aliran fluida (tidak tetap) kurang bersifat umum dan kurang fundamental sehingga tidak dapat dipakai sebagai rujukan yang ilmiah. Oleh sebab itu diperlukan pemodelan turbulen di sekitar dinding secara lebih fundamental dan memiliki makna fisis yang relevan dengan pertukaran panas dan energi di sekitar dinding konduksi. Pendekatan ini menghasilkan perumusan matematis yang relatif kompleks dengan ukuran grid yang relatif kurang besar, tetapi variabel fisis dari turbulen bisa dihitung secara akurat di boundary layer (Gunarjo 2009).

Modifikasi model turbulen dilakukan dengan cara (1) mengintegrasikan persamaan transport energy kinetic, persamaan disipasi energy, persamaan varian suhu, (2) membuat perumusan matematis tentang Reynold stress dan heat flux, (3) menggunakan pendekatan relaksasi eliptis (Gunarjo, 2009).

Penelitian dengan model serupa juga telah dilakukan pada pemanasan dari samping (heated from the side) pada natural convection maupun pemanasan dari bawah (heated from below Rayleigh Benard convection) dan divalidasi menggunakan data dari (Worner 1994). Validasi terhadap akurasi model turbulen juga dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan perhitungan *direct numerical simulation* DNS, yaitu simulasi yang tanpa menggunakan model.

Terdapat lima buah persamaan pokok dalam model turbulen yang dikembangkan dalam tulisan ini. Persamaan kontinuitas untuk momentum dan energi digunakan pendekatan Boussinesq sebanyak dua persamaan yaitu:

$$\frac{DU_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ v \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right] \tag{1}$$

$$\frac{Dk}{Dt} = -\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \rho g_i \overline{\theta u_i} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right] \tag{2}$$

Tiga buah persamaan transport yang lain adalah persamaan energi kineti *k*, persamaan disipasi energi  $\varepsilon$ , dan persamaan *variance temperature*  $\vartheta$  yang dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{Dk}{Dt} = -\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \rho g_i \overline{\theta u_i} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right] \tag{3}$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{C_1(Pi + G) - C_2\varepsilon}{\tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \tag{4}$$

$$\frac{D\overline{\theta^2}}{Dt} = -2\overline{\theta u_j} \frac{\partial T}{\partial x_j} - 2\varepsilon_\theta + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\theta} \right) \frac{\partial \overline{\theta^2}}{\partial x_j} \right] \tag{5}$$

Kelima persamaan transport tersebut di atas didiskritisasi dengan pendekatan metode control volume Ferziger (1996). Dari hasil Reynolds Averaging terhadap persamaan diperoleh dua variabel baru yang harus dimodelkan yaitu Reynolds stress  $u_i u_j$  dan heat flux  $\vartheta u_i$

Variabel pertama Reynolds stress dimodelkan dengan modifikasi dari eddy viscosity, yaitu dengan memperhitungkan aspek buoyancy. Perumusan variabel ini dinyatakan secara aljabar dan tidak dituliskan sebagai persamaan transport seperti pada second moment closure Dol *et al* (1996). Perumusan secara aljabar dapat mengurangi kompleksitas pemodelan dan waktu komputasi. Persamaan Reynolds stress ini dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\overline{u_i u_j} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - C_\mu \tau \overline{v^2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + C_\theta \tau \beta g_j \overline{\theta u_i} \tag{6}$$

Suku ketiga dari persamaan (6) merupakan hubungan antara Reynolds stress dan heat flux yang memperhitungkan pengaruh buoyansi.

Persamaan heat flux dirumuskan dengan pendekatan dan asumsi adanya keseimbangan yang lemah (*weak equilibrium condition*) dan dinyatakan sebagai berikut:

$$\overline{\theta u_i} = C_\theta \tau \left( \overline{v u_i} \frac{\partial T}{\partial x_j} + \xi \overline{\theta u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \beta g_i \overline{\theta^2} \right) \tag{7}$$

**Nomenclature:**

- Re : Reynolds
- Pr : Prandl Number
- v:Viscositas
- $u_i u_j$ : Reynolds stress
- $u_i \vartheta$ : Turbulen flux
- $\tau$ : Time scale
- k: turbulent enrgy
- $\varepsilon$ :dissipation
- $C_1, C_2, C_\theta$ : coefficients
- T: Temperature
- $\beta$ : linear exp. coeff

**METODE PENELITIAN**

Persamaan transport yang digunakan dalam model turbulen ini didiskritisasi secara geometri non-ortogonal dengan control volume method. Simulasi dilakukan dengan menggunakan solver Navier-Stokes. Grid dari simulasi menggunakan susunan collocated seperti yang dilakukan Kenjeres (2002). Ukuran grid yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebesar 62 x 62 x 62 dengan jarak spasi yang tidak homogen. Spasi grid yang dekat dengan dinding diambil jauh lebih kecil dari spasi di daerah yang jauh dari bidang batas. Alasan dari ketidak homogenan spasi adalah turbulensi terjadi sangat intensif di daerah dekat dinding dan perbatasan sehingga harus dihitung secara lebih detail. Diskritisasi menggunakan pendekatan *Central Differencing Scheme CDS, Second Order Linear Upwind LUDS*, dan *Quadratic Upwind QUICK* yang diadopsi dari model yang dikembangkan oleh Ferziger (1996). Metode numerik yang digunakan terbukti stabil dan memberikan hasil yang akurat untuk simulasi.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Simulasi dengan menggunakan model turbulen diterapkan pada ruangan dengan sebuah pemanas. Tingkat turbulensi diambil pada Rayleigh number  $Ra = 5 \times 10^{10}$  dengan ukuran grid 62 x 62 x 62. Simulasi dilakukan pada cavity berbentuk kubus yang dipanasi dari samping. Secara umum aliran fluida di dalam ruangan berbentuk kubus terbagi menjadi dua bagian besar, yaitu boundary layer di sekitar dinding konduksi baik yang panas maupun yang dingin dan rotasi stratifikasi panas di tengah-tengah ruang. Dua aliran utama udara ini dapat dilihat secara jelas pada gambar 1 dimana stream line, kontor temperature dan energi kinetik divisualisasikan di tengah-tengah bidang vertical  $z/D = 0,5$ . Vektor yang intensitasnya rapat menunjukkan bahwa di area itu memiliki pertukaran momentum, energi dan panas yang sangat tinggi, sedangkan di area dimana vektor tidak rapat menunjukkan kondisi yang sebaliknya, yaitu tidak banyak terjadi pertukaran momentum, energi dan panas. Bisa dikatakan bahwa aliran turbulen hanya

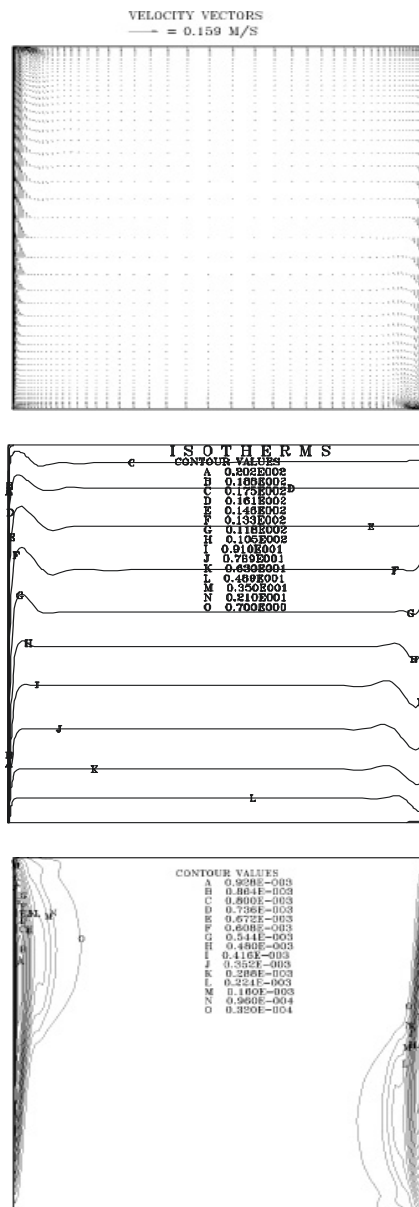
terjadi di area sekitar dinding konduksi dan selebihnya berupa aliran laminar. Kondisi ini sangat menarik dan menantang untuk pengembangan model turbulen, karena satu kasus aliran dapat berupa laminar, transisi dan turbulen.

Dilihat dari gambar 2, profil kecepatan vertical di tengah ruangan  $z/D = 0,5$  dengan  $y/H = 0,5$  model dapat memprediksi relative akurat terhadap hasil eksperimen, bahkan di area yang jauh dari dinding bisa diprediksi sangat akurat. Begitu juga dibandingkan dengan hasil simulasi dengan model yang lebih kompleks dari Dol *et al*, model ini relative baik dan sesuai.

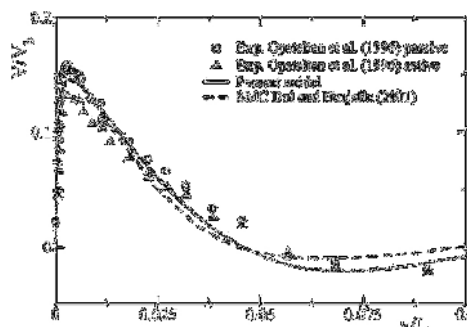
Gambar 3 adalah kontor Nusselt number yang menggambarkan tingkat turbulensi aliran fluida. Seperti terlihat pada gambar 1.a. bahwa pada Nusselt number  $10^6$  kontornya masih sangat rata dan tidak terdapat lengkungan-lengkungan. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat transfer panas pada kondisi ini relative lemah. Pada gambar 1.b terlihat bahwa kontor mulai tidak merata yang ditunjukkan dengan adanya puncak-lembah di beberapa posisi. Pada kondisi ini Nusselt number bernilai  $10^7$ , dimana tingkat turbulensinya dalam kondisi sedang. Transfer panas terlihat mulai intensif terjadi pada posisi-posisi yang sesuai dengan puncak dan lembah. Sedangkan pada Nusselt number  $10^8$  (gambar 1.c) terlihat bahwa kontornya menunjukkan turbulensi yang cukup tinggi

Simulasi juga dilakukan pada cavity dengan rasio H:D:L= 1:2:3 dengan ukuran grid yang semakin rapat di area dekat dinding, yaitu  $102 \times 62 \times 62$ . Untuk mencapai solusi yang stabil simulasi dimulai dengan tingkat bilangan Rayleigh yang relative rendah dan kemudian diatur sampai pada  $Ra = 5 \times 10^{10}$  dengan factor underrelaxation yang berbeda untuk setiap variable. Pencapaian konvergensi dipercepat dengan menerapkan time step kecil dan meningkat secara teratur sampai tercapainya solusi yang stabil pada residual  $10^{-6}$ .

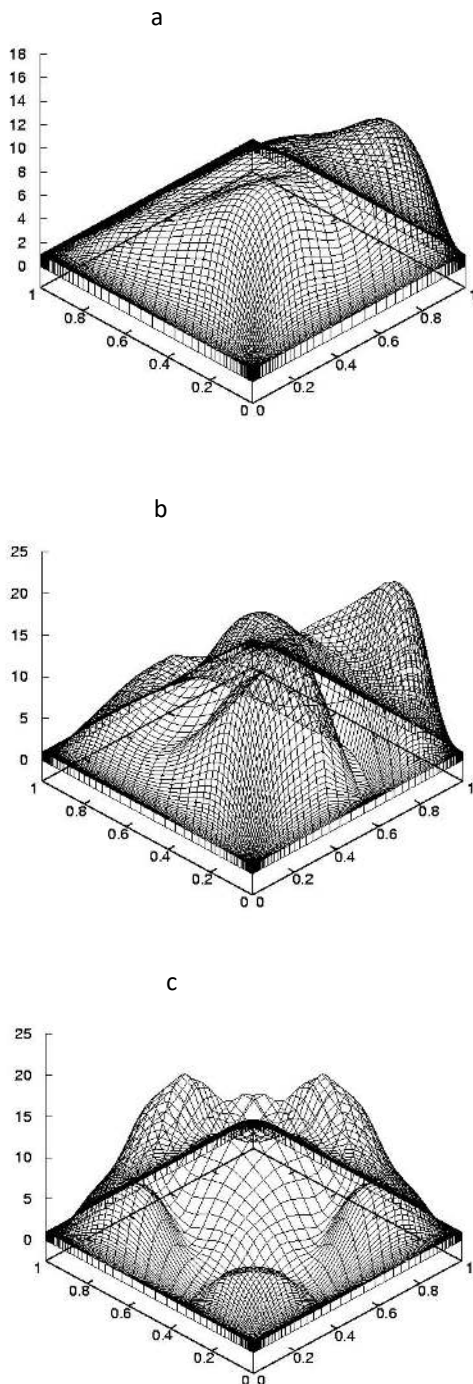
Gambar 4 menunjukkan kontor kecepatan, energi kinetic, temperature dan varian temperatur. Vektor kecepatan menunjukkan tipikal boundary layer pada pemanasan dari sisi samping cavity, yaitu aliran intensif yang tipis dengan kecepatan tinggi. Sedangkan di area tengah cavity terlihat kosong yang menunjukkan kondisi laminar yang mendekati stagnan. Profil yang serupa dengan aliran pada cavity yang berbentuk kubus juga terjadi pada kontor energi kinetic, temperature dan varian temperature. Perlu dilaporkan bahwa kecepatan maksimum fluida dengan bilangan Rayleigh yang sama justru lebih cepat dibandingkan pada cavity berbentuk kubus, yaitu  $0,244 \text{ m/s}$ ;  $1,59 \text{ m/s}$ .



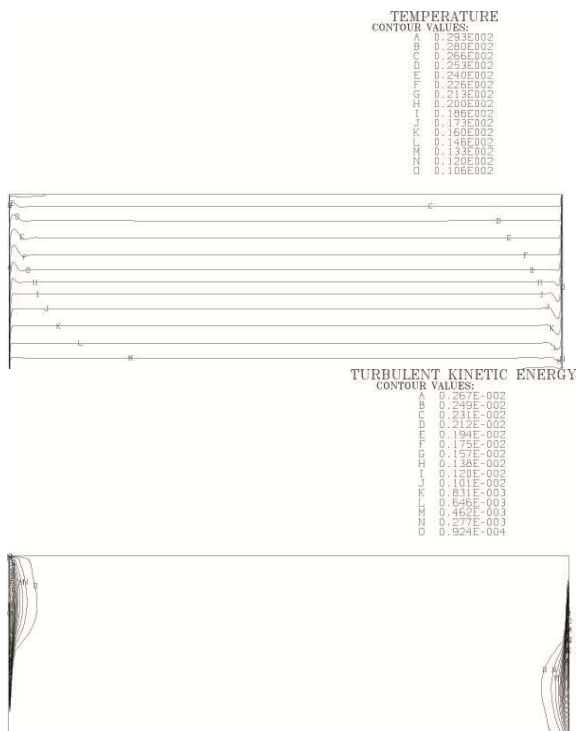
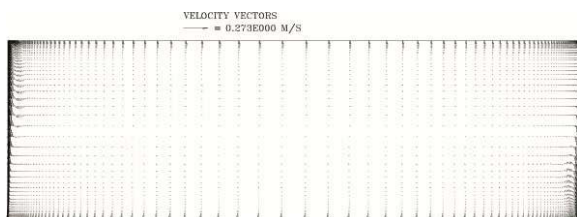
Gambar 1. Vektor kecepatan, kontor temperature dan energi kinetic



Gambar 2. Kecepatan vertical hasil eksperimen dan simulasi



Gambar 3. Kontor Nusselt Number (a)  $10^6$  (b)  $10^7$ , (c)  $10^8$



Gambar 4. Vektor kecepatan, kontur energi kinetic dan temperature.

**KESIMPULAN**

Simulasi aliran udara udara di ruangan telah disimulasikan dengan menggunakan model turbulen. Model ini relatif stabil, relatif tidak kompleks, ukuran grid yang sedikit dan konvergen secara cepat. Profil aliran udara yang diprediksi oleh model ini sangat sesuai dengan kaidah-kaidah fisika bidang termodinamika fluida. Model ini juga dapat diaplikasikan pada geometri yang kompleks dan tingkat turbulensi yang lebih tinggi.

**DAFTAR PUSTAKA**

Dol, K. Hanjalic, and S. Kenjeres. *A comparative assessment of the second moment differential and algebraic model in turbulent natural convection*. International Journal Heat and Fluid Flows, 18(1), pp.4-14, 1999.

Ferziger and M Peric. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer, Berlin, Germany, 1996

Gunarjo, S.B. (2009). *Application of elliptic relaxation approach of turbulent natural convection*. International conference on basic sciences, Airlangga University, Surabaya.

Hanjalic K. and Launder B.E. (1976) *Contribution towards a Reynolds stress closure for low-Reynolds number turbulence*. J. Fluid Mech. 74, 593 – 610.

Kenjeres, *A trans/vles approach to indoor climate simulations*. In 2002 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, Montreal, Quebec, Canada, 2002.

Patel, V.C, Rodi, W., and Scheurer, W. (1985) *Turbulence models for near-wall low Reynolds number flows: a review*. AIAA J. 23, 1308 - 1319

Worner, M. *Direkte simulation turbulenter Rayleigh-Benard Konvektion in Fluessigem Natrium*, Ph.D. Thesis, University of Karlsruhe, KfK, 5228, Kernforschungszentrum Karlsruhe,1994