

Simulasi Numerik Pemisahan Aliran Dingin-Panas di dalam Tabung Vorteks

Radi Suradi K^{1)*}, Sugianto¹⁾

¹⁾Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung
Jl. Gegerkalong Hilir, Bandung 40012
Email: radisuradik@gmail.com
Email: sugizaps@gmail.com

Abstrak

Vortex tube yang dikenal dengan nama Ranque Hilsch Vortex Tube (RHVT) adalah sebuah alat sederhana tanpa ada komponen yang bergerak di dalamnya yang memisahkan udara masuk yang bertekanan menjadi dua aliran terpisah yaitu udara panas dan udara dingin secara bersamaan pada masing-masing keluarannya. Proses pemisahan dua aliran dimana yang satu menjadi aliran dingin dan yang satu menjadi aliran panas bisa ditinjau sebagai proses pemisahan energi. Teori mengenai proses pemisahan energi umumnya didapat dari hasil experiment dan sebagian dari simulasi numerik. Paper ini membahas mengenai fenomena pemisahan aliran dingin dan panas di dalam RHVT jenis counter flow pada tekanan udara masuk ke nosel sebesar 2 atm dengan jumlah nosel 2 buah. Kajian dilakukan secara numerik menggunakan perangkat lunak komputasi dinamika fluida Fluent. Kajian numerik ini menggunakan model aliran viscous Kappa Epsilon (k-e) dengan domain komputasi 3D. Hasil simulasi numerik properties fluida ditampilkan dalam bentuk visualisasi kontur, vektor dan garis alir kecepatan axial, kecepatan radial dan juga aliran sirkulasi balik beserta distribusi tekanan dan temperatur yang terjadi didalam tabung vorteks. Kinerja RHVT ditunjukkan oleh kurva selisih temperatur udara masuk dengan temperatur udara keluar dingin T_c terhadap fraksi massa udara dingin terhadap massa udara masuk dua nosel.

Kata kunci: Fluent, kappa-epsilon, Ranque Hilsch Vortex Tube, simulasi numerik, tabung vorteks, vorteks aliran

Abstract

Vortex tube known as Ranque Hilsch Vortex Tube (RHVT) is a simple device with no moving parts in it that separates the pressurized air to enter into two separate streams of air that is hot and cold air simultaneously on each output. The process of separation of the two streams which flow one into the cold and the heat flow can be viewed as the energy separation process. The theory of the separation process generally makes the energy obtained from the experiment and most of the numerical simulations. This paper discusses the phenomenon of separation of cold and heat flow in the counter flow type RHVT the air into the nozzle pressure of 2 atm with a number of nozzles 2 pieces. Studies performed numerically using computational fluid dynamics software FLUENT. This numerical study using a model of the flow of viscous Kappa Epsilon of the 3D computational domain. The results of numerical simulations of fluid properties displayed in the form of contour visualization, flow velocity vector and the line of axial, radial velocity and flow recirculation along with pressure and temperature distribution that occurs in the vortex tube. RHVT performance curve is shown by the difference in temperature of the inlet air temperature T_c cold air out of the cold air mass fraction of the mass of air entering the two nozzles.

Keywords: Fluent, kappa-epsilon, Ranque Hilsch Vortex Tube, numerical simulation, vortex tube, vortex of flow

1. PENDAHULUAN

Vortex tube yang dikenal dengan nama Hilsch atau Ranque tube (yang kemudian disebut dengan RHVT: Ranque Hilsch Vortex Tube) adalah sebuah alat sederhana tanpa ada komponen yang bergerak didalamnya yang menghasilkan udara masuk yang bertekanan menjadi dua aliran terpisah yaitu udara panas dan udara dingin secara bersamaan pada masing-masing keluarannya[1,2]

Proses pemisahan dua aliran, dimana yang satu menjadi dingin dan yang satu menjadi panas bisa ditinjau sebagai proses pemisahan energi. Teori mengenai proses pemisahan energi umumnya didapat dari hasil eksperimen dan sebagian dari simulasi numerik [1,2].

Salah satu teori tentang fenomena tersebut di atas adalah seperti yang dikemukakan oleh

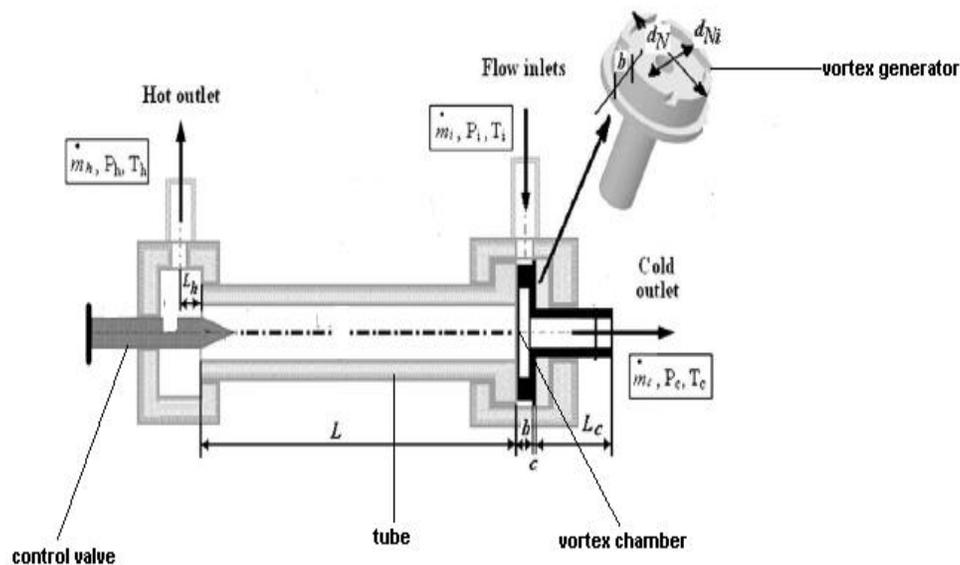
*Penulis korespondensi, Telp : 022-201 4529
Email: radisuradik@gmail.com

Wood [3] yang menyatakan bahwa perbedaan temperatur antara kedua arus yang keluar yang ditinjau sebagai proses pemisahan energi yang dipengaruhi oleh gradient tekanan dan viskositas fluida. Pengaruh gradien tekanan radial pada setiap vorteks yang disebabkan oleh gaya sentrifugal pada fluida yang berputar, sehingga gas yang berada di dekat sumbu tekanannya lebih rendah sementara gas yang berada di bagian dinding luar dimampatkan sehingga tekanan menjadi lebih besar dan pengaruh viskositas fluida mencegah terjadinya vorteks yang benar-benar bebas yang mana dari satu lapisan melingkar tidak terjadinya perpindahan energi ke lapisan yang berikutnya (viskositas fluida cenderung menghasilkan vorteks yang rapat atau yang dipaksa/forced dimana kemungkinan terjadi perpindahan energi dari lapisan dalam ke arah lapisan luar, karena lapisan luar ini menahan kecepatan tangential lapisan dalam).

Permasalahan fenomena separasi energi yang terjadi di dalam RHVT masih menjadi bahan kajian yang menarik, belum ada teori yang bersifat baku yang dapat menjelaskan secara tuntas, baik tentang fenomena transfer panas yang terjadi ataupun teori bagaimana cara mendapatkan penurunan temperatur yang maksimal, yang secara tidak langsung menunjukkan keoptimalan dari sebuah RHVT [1,2].

Secara fisik untuk mengamati proses separasi energi ini terjadi dapat diamati tetapi tentunya akan memerlukan peralatan lebih kompleks dari segi instalasi dan alat ukurnya. Pemakaian tabung yang transparan seperti flexyglass dan menyuntikan cairan tambahan ataupun asap memungkinkan pengamatan secara visual terjadinya pola aliran dan separasi energi di dalam RHVT, tetapi hasil yang didapat baru sebatas kualitatif. Untuk mendapatkan hasil secara kuantitatif dari perubahan properties fluida tentu memerlukan alat ukur yang dapat ditempatkan sepanjang arah longitudinal dan radial RHVT dan tidak mengganggu aliran fluida. Hal ini yang masih menjadi kendala dalam penelitian tentang proses separasi energi di RHVT ini[1,2].

RHVT dan variasi banyaknya nosel pada vortex generator yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada lihat Gambar 1. Jenisnya adalah type counter flow, dengan diameter pipa keluaran udara panas 10 mm, diameter keluaran udara dingin 5 mm dan panjang 100 mm, mempunyai jumlah noselnya 2, luas penampang masuk $5,19 \text{ mm}^2$, lebar vortex chamber 1,5 mm dan lebar gap keluaran udara panas 1 mm.

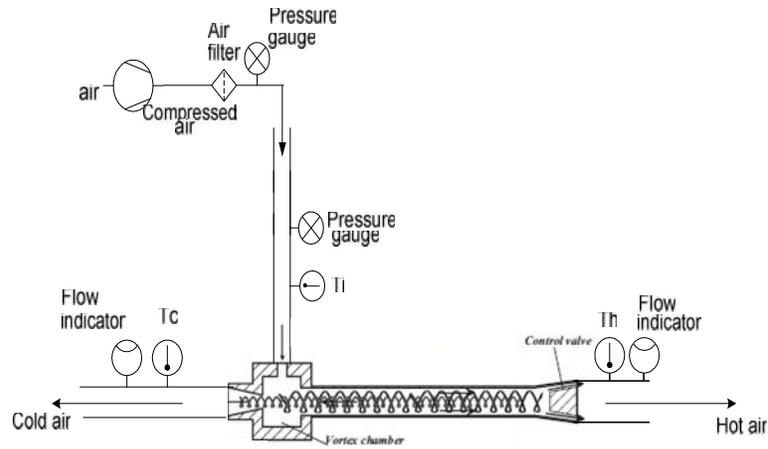


Gambar 1. Counter flow vortex tube dan bagian-bagiannya

2. METODE

2.1. Prosedur eksperimen

Proses pengujian pemisahan aliran udara panas dan dingin pada jumlah nosel 2 di dalam RHTV terlihat seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema pengujian RHTV counter flow [1,2]

Prosedur pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Sumber udara bertekanan berasal dari pressure vessel pada kondisi tekanan tetap sebesar 2 atm
2. Flow control dilakukan control valve mengatur fraksi dingin dan fraksi panas. Fraksi udara dingin yang akan diatur mulai bertahap dari 10% hingga mencapai 80% dari jumlah udara total.

2.2. Persamaan gerak fluida dan diskretisasi

Hukum kekekalan massa atau kontinuitas dapat dituliskan dalam bentuk integral sebagai berikut [1]

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \dots dV + \iint_A \dots \vec{U} \cdot \vec{dA} = 0 \quad (1)$$

Hukum kekekalan momentum dapat dituliskan dalam bentuk integral sebagai berikut[1]

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \dots \vec{U} dV + \iint_A (\dots \vec{U} \cdot \vec{dA}) \vec{U} = - \iint_A P \vec{dA} + \iint_V \dots \vec{f} dV + \vec{F}_{viscous} \quad (2)$$

Hukum kekekalan energi dapat dituliskan dalam bentuk integral sebagai berikut [1]

$$\begin{aligned} \iint_V \dot{q} \dots dV + \dot{Q}_{viscous} - \iint_A P \vec{U} \cdot \vec{dA} + \iint_V \dots (\vec{f} \cdot \vec{U}) dV + \dot{W}_{viscous} = \\ \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \dots \left(e + \frac{U^2}{2} \right) dV + \iint_A \dots \left(e + \frac{U^2}{2} \right) \vec{U} \cdot \vec{dA} \end{aligned} \quad (3)$$

Aliran turbulen dicirikan adanya medan kecepatan yang fluktuatif. Fluktuasi ini merupakan gabungan kuantitas transport seperti momentum dan energi. Fluktuasi ini mempunyai nilai yang relatif kecil dan frekuensi tinggi.

Proses komputasi menjadi terlalu mahal untuk mensimulasikan secara langsung (Direct Numerical Simulation: DNS) semua parameter teknik. Sehingga untuk mempermudah proses komputasi dibutuhkan sekumpulan persamaan yang terdiri dari variabel yang tidak diketahui yang telah dimodifikasi. Untuk itu dibutuhkan model turbulensi untuk menentukan variabel-variabel dalam bentuk kuantitas yang tidak diketahui.

Model turbulensi yang digunakan dalam penelitian ini adalah model kappa-epsilon (k-e). Model k-e merupakan model untuk memecahkan persamaan (1, 2 dan 3).

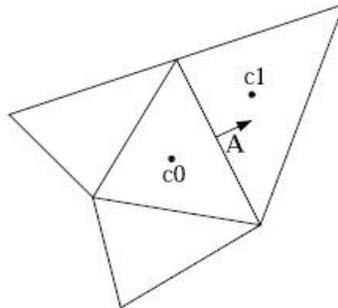
Untuk kondisi aliran tunak (steady), jika variabel tak bebas W adalah fungsi ruang $W = f(x, y, z)$ yang tidak diketahui adalah solusi dari persamaan model gerak fluida (persamaan 1, 2 dan 3) serta persamaan model turbulen k-e dan W merupakan kuantitas skalar (tekanan, densitas dan sejenisnya) atau kuantitas kecepatan, maka persamaan (1,2, 3 dan k-e) dapat dituliskan dalam bentuk persamaan yang mengandung W sebagai berikut [1]

$$\oint_A \dots w \vec{U} \cdot \vec{dA} = \oint_A \Gamma_w \nabla w \cdot \vec{dA} + \iiint_V S_w dV \quad (4)$$

dimana Γ_w adalah koefisien difusi dari variabel w , ∇w adalah gradient w dan S_w adalah sumber dari w persatuan volume. Fluent.Inc menggunakan teknik kendali volume (control volume) untuk mengubah persamaan (4) kedalam bentuk persamaan aljabar yang dapat dicari solusinya.

Untuk mendapatkan bentuk aljabar dari persamaan (4), maka dilakukan langkah sebagai berikut. Langkah pertama adalah melakukan diskretisasi persamaan 4 yang langkah selanjutnya adalah mengubah persamaan diskret menjadi bentuk aljabar.

Pada diskretisasi untuk mendapatkan solusi w , maka domain kontinu diubah menjadi domain diskret dalam bentuk cell 3D yaitu segiempat atau segitiga (quadrilateral cell atau triangular cell), sebagai contoh digunakan cell segitiga seperti tampak pada Gambar 3 [4]



Gambar 3. Ilustrasi control volume menggunakan cell segitiga untuk diskretisasi [4]

Sehingga persamaan (4) dalam domain kontinu diubah dalam bentuk domain diskret (diskontinu) yang dapat dituliskan sebagai berikut [4]

$$\sum_f^{N_{face}} \vec{U}_f w_f A_f = \sum_f^{N_{face}} \Gamma_w (\nabla w)_n A_f + S_w V \quad (5)$$

dimana N_{face} adalah jumlah muka pada cell tertutup, w_f nilai w yang dikonveksikan melalui muka f , \vec{U}_f adalah fluks massa melalui muka, $(\nabla w)_n$ adalah besar gradien w normal terhadap muka f dan V adalah volume cell.

Nilai w yang diperoleh dari komputasi disimpan pada pusat cell grid yaitu titik $c_0, c_1 \dots c_n$ di dalam Gambar 3 dan nilai w_f dibutuhkan untuk mengkonveksi bentuk persamaan 5 dengan cara interpolasi nilai-nilai pusat cell.

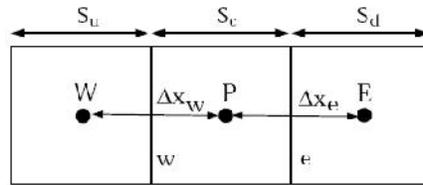
Untuk mendapatkan nilai w_f , maka dapat dilakukan dengan menggunakan skema upwind. Skema upwind yang digunakan adalah derajat dua untuk mendapatkan tingkat akurasi yang lebih tinggi. Berdasarkan pendekatan deret Taylor, maka nilai w_f dapat dituliskan sebagai berikut [4]

$$w_f = w + \nabla w \cdot \vec{dr} \quad (6)$$

$$\nabla w = \frac{1}{V} \sum_f^{N_{face}} w_f A \quad (7)$$

dimana w dan ∇w adalah nilai pada pusat cell dan nilai gradien pada cell depan (upstream cell), \vec{dr} adalah vektor perpindahan dari pusat cell ke pusat muka dan \bar{w}_f adalah nilai rata-rata w yang dihitung dari dua cell yang dipisahkan oleh muka cell yang sama.

Ilustrasi persamaan (4) untuk tipe cell segiempat dengan pusat cell adalah W, P dan E dan muka cell w dan e seperti tampak pada Gambar 4.

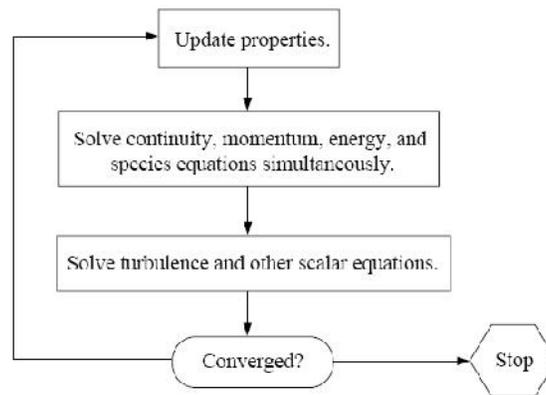


Gambar 4. Kontrol volume menggunakan quadrilateral grid [4]

Berdasarkan Gambar 4, maka dapat ditentukan nilai W pada muka e yaitu w_e yang dapat dituliskan sebagai berikut [4]

$$w_e = \frac{S_u + 2S_c}{S_u + S_c} W_P - \frac{S_c}{S_u + S_c} W_W \quad (8)$$

Untuk mendapatkan solusi W maka dilakukan dengan metode couple, diagramnya dapat digambarkan seperti tampak pada Gambar 5.



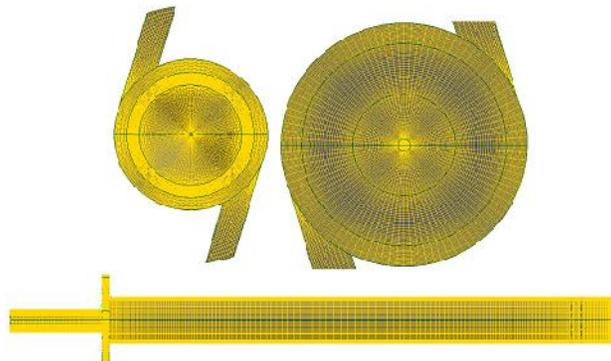
Gambar 5. Diagram alir solusi dengan metode couple [4]

2.3. Prosedur simulasi numerik

Geometri vortex tube seperti tampak pada Gambar 6 dan meshing grid domain komputasi vorteks menggunakan jenis meshing segiempat. Domain komputasi yang telah di meshing, seperti tampak pada Gambar 7 menggunakan Gambit versi 2.4.



Gambar 6. Geometri RHVT

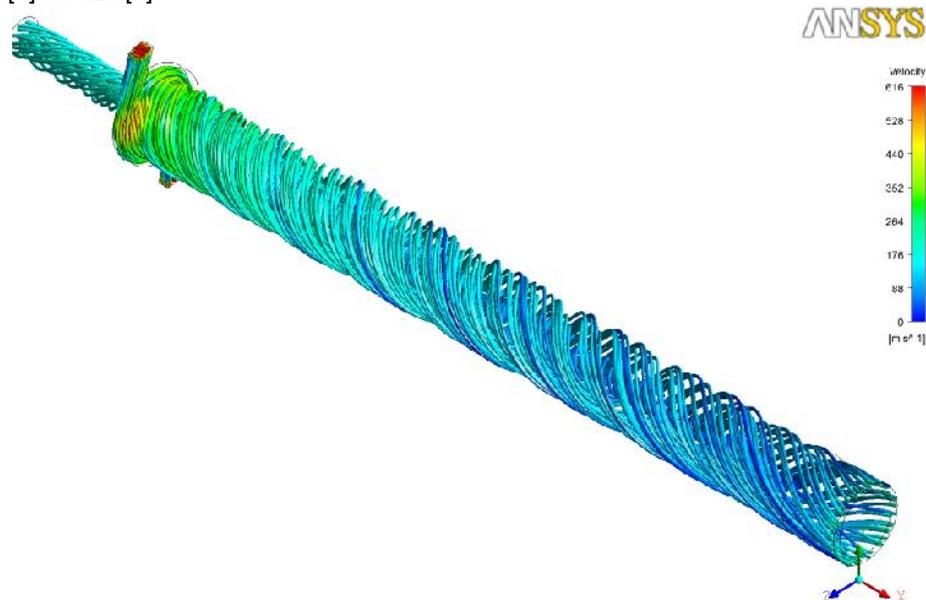


Gambar 7. Meshing domain komputasi RHVT berjumlah 1,73 juta mesh

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

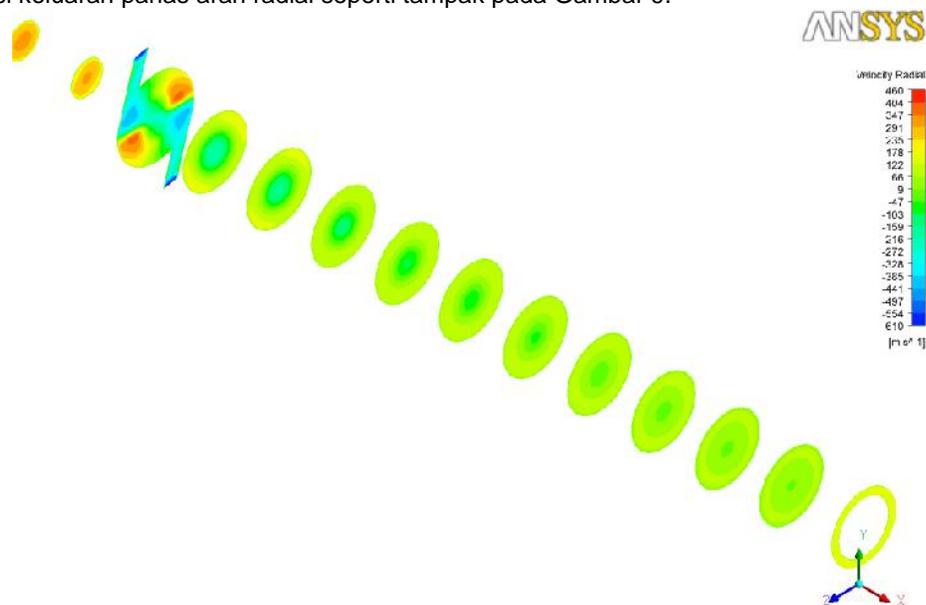
3.1. Hasil Simulasi Numerik

Kaji simulasi numerik aliran di dalam RHVT menggunakan solver perangkat lunak Fluent.Inc versi 14 dengan model turbulensi k-e pada RHTV counter flow dengan 2 inlet (2 nosel) dan tekanan 2 atm. Hasil simulasi ditampilkan seperti tampak pada Gambar 8 sampai Gambar 13, yang menunjukkan kontur kecepatan aliran berputar (swirl flow) yang lebih besar pada dekat dinding dibandingkan aliran pada pusat RHTV. Hasil ini diperkuat dan telah dilakukan oleh Saeid dkk[5], Pourmahmoud dkk[6], Alireza dkk[7] dan Zin[8].



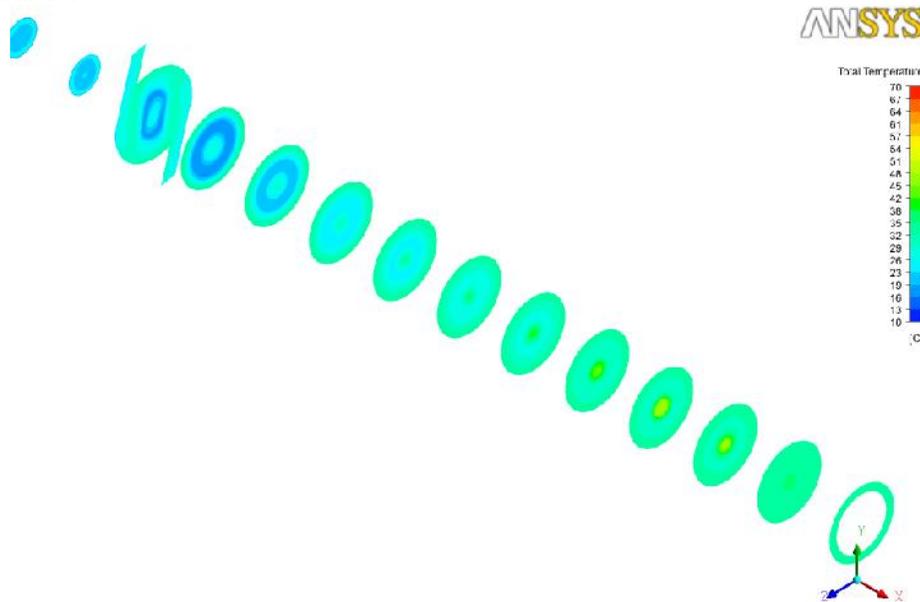
Gambar 8. Kecepatan aliran swirl di dalam RHVT dengan model turbulensi k- pada fraksi dingin 23.93%.

Berdasarkan Gambar 8, tampak terlihat kecepatan aliran masuk nosel sebesar 616 m/s serta kecepatan aliran keluar nosel sekitar 440 m/s. Akibat posisi 2 nosel sedemikian rupa menyebabkan aliran longitudinal yaitu aliran sepanjang tabung arah koordinat x positif membentuk pusaran (swirl) dengan kecepatan yang semakin menurun dalam rentang 80 m/s (dekat dinding) sampai 175 m/s pada posisi keluaran panas arah radial seperti tampak pada Gambar 9.



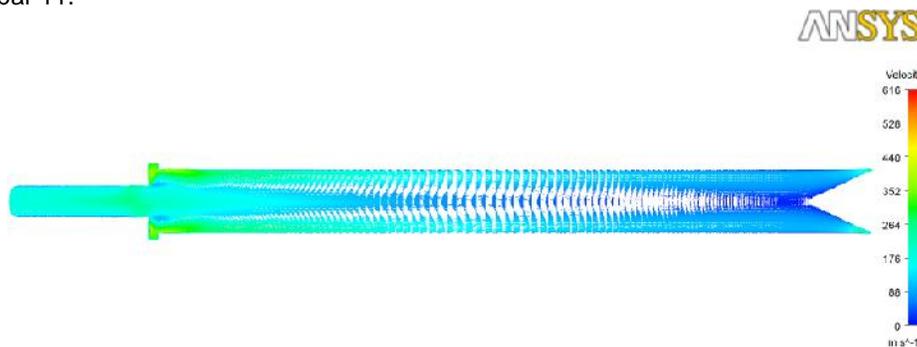
Gambar 9. Kontur kecepatan radial aliran di dalam RHVT dengan model turbulensi k- pada fraksi dingin 23.93%.

Berdasarkan Gambar 9, tampak terlihat kecepatan arah radial pada daerah dekat dinding tabung cenderung lebih besar dibandingkan kecepatan radial pada daerah pusat tabung. Hal tersebut diakibatkan oleh perpindahan panas dari aliran pusat tabung menuju aliran dekat dinding tabung sehingga aliran pada daerah pusat tabung mengalami penurunan energi kinetik dan aliran dekat dinding tabung mengalami peningkatan energi kinetik. Hal tersebut akan menurunkan temperatur aliran daerah pusat tabung dan meningkatkan temperatur aliran dekat dinding tabung seperti tampak pada Gambar 10.



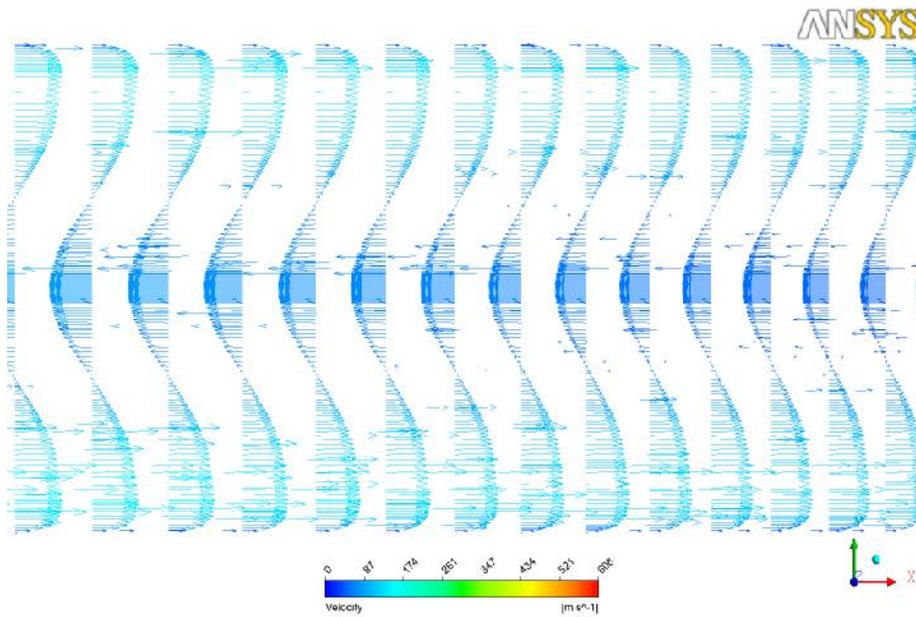
Gambar 10. Kontur total temperatur aliran di dalam RHVT dengan model turbulensi k- pada fraksi dingin 23.93%.

Berdasarkan Gambar 10, tampak terlihat distribusi temperatur arah radial mempunyai kecenderungan meningkat hal ini disebabkan perpindahan panas dari aliran pusat tabung menuju dekat dinding tabung dan tampak pula terlihat distribusi temperatur sepanjang tabung arah koordinat x positif cenderung mengalami peningkatan dan sebaliknya distribusi temperatur sepanjang tabung arah koordinat x negatif cenderung mengalami penurunan. Aliran dekat dinding tabung yang mempunyai temperatur lebih tinggi akan keluar menuju daerah keluaran panas dan aliran dekat pusat tabung yang mempunyai temperatur lebih rendah akan keluar menuju ke daerah keluaran dingin seperti tampak pada Gambar 11.



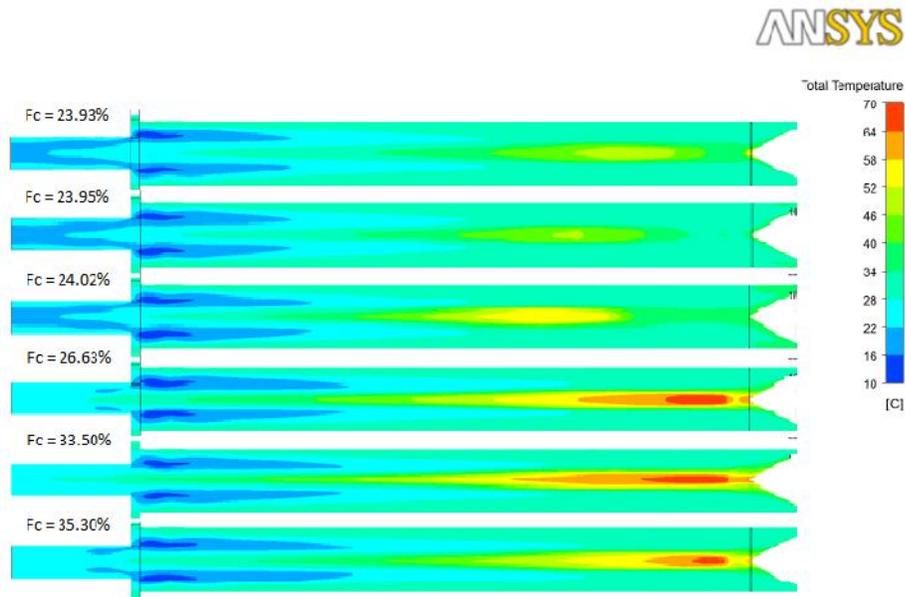
Gambar 11. Vektor kecepatan aliran di dalam RHVT dengan model turbulensi k- pada fraksi dingin 23.93%

Berdasarkan Gambar 11, tampak terlihat vektor aliran dekat dinding tabung menuju daerah keluaran panas dan vektor aliran pada pusat tabung menuju keluaran daerah dingin. Vektor aliran dekat keluaran panas dapat lebih jelas terlihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Zoom vektor kecepatan aliran di dalam RHVT dengan model turbulensi k- pada fraksi dingin 23.93%

Temperatur aliran keluar dingin dipengaruhi oleh variasi tekanan output yang ditunjukkan dalam bentuk nilai fraksi dingin aliran yaitu perbandingan laju massa aliran keluaran dingin terhadap laju massa aliran masuk nosel seperti tampak pada Gambar 13.

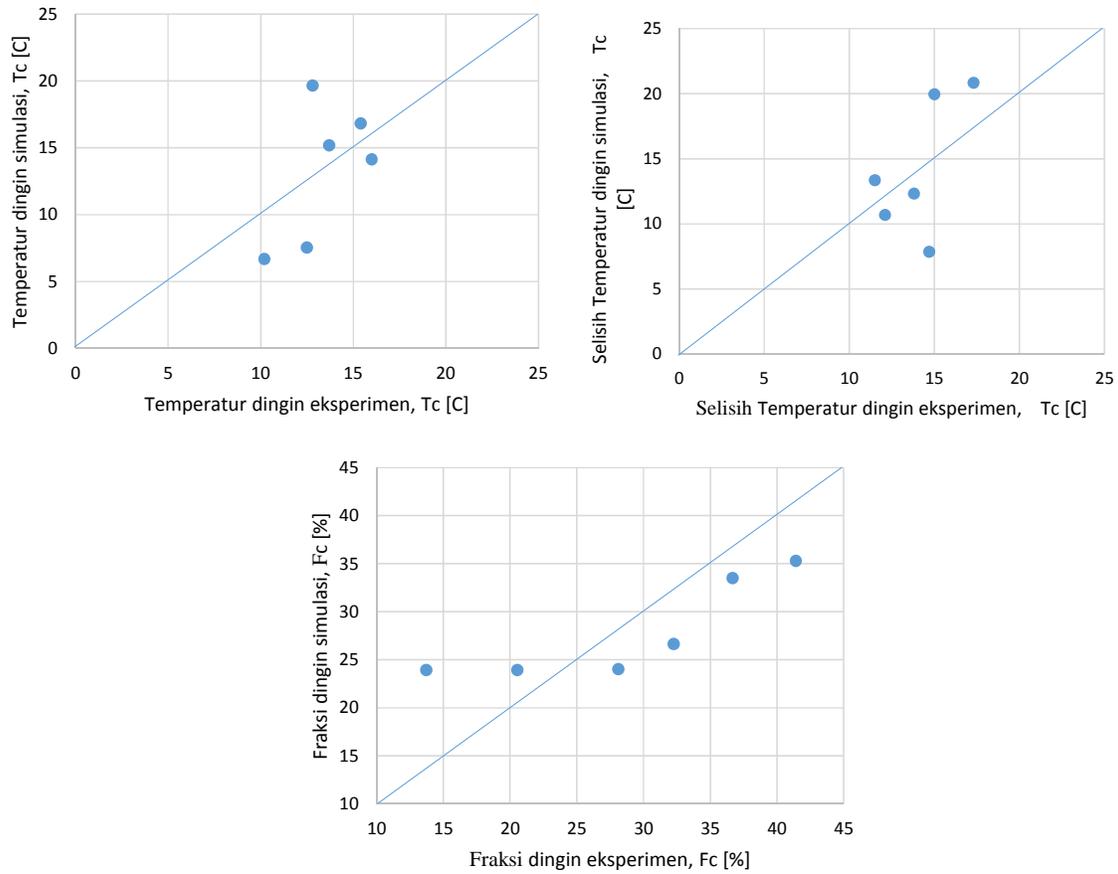


Gambar 13. Kontur total temperatur aliran di dalam RHVT dengan model turbulensi k- pada variasi fraksi dingin (Fc)

Berdasarkan Gambar 13, tampak terlihat pengaruh fraksi dingin terhadap temperatur keluaran dingin. Semakin meningkat nilai fraksi dingin dari 23,93% menuju 35,30%, maka temperatur keluaran dingin akan meningkat dalam rentang dari 16° C - 22° C sampai 22° C - 28° C.

3.2. Perbandingan hasil simulasi dan hasil pengujian

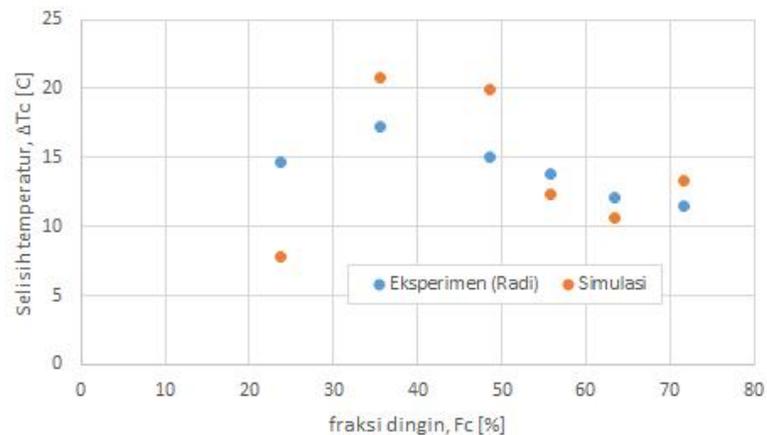
Perbandingan hasil simulasi dengan eksperimen (hasil pengujian Suradi dkk[2]) temperatur dingin, selisih temperatur udara masuk dengan temperatur dingin dan fraksi dingin disajikan dalam bentuk kurva seperti tampak pada Gambar 14 dan pengaruh fraksi dingin terhadap selisih temperatur seperti tampak pada Gambar 15.



Gambar 14. Kurva temperatur dingin dan fraksi massa dingin hasil simulasi dan hasil eksperimen.

Berdasarkan Gambar 14, tampak terlihat titik-titik data hasil simulasi terhadap hasil eksperimen yang mempunyai tingkat kedekatan yang bervariasi terhadap garis ideal yaitu garis yang menunjukkan nilai simulasi sama dengan nilai eksperimen. Tingkat kedekatan titik data terhadap garis ideal ditunjukkan dalam bentuk nilai penyimpangan rata-rata. Penyimpangan rata-rata nilai simulasi terhadap nilai pengujian untuk nilai temperatur dingin adalah 15%, penyimpangan rata-rata untuk nilai selisih temperatur dingin adalah 15% dan Penyimpangan rata-rata untuk nilai fraksi dingin adalah 20%.

Hasil simulasi pada kondisi tekanan masuk 2 atm terhadap variasi fraksi dingin yang diperoleh dengan memvariasikan kondisi tekanan output sesuai hasil pengujian Suradi dkk [2] menunjukkan adanya kecenderungan bahwa peningkatan fraksi dingin akan meningkatkan temperatur atau perubahan temperatur dingin aliran keluar RHVT seperti tampak pada Gambar 15.



Gambar 15: Kurva selisih temperature dingin terhadap fraksi dingin hasil eksperimen dan simulasi.

4. SIMPULAN

Hasil verifikasi data simulasi numerik untuk kondisi tekanan udara masuk nosel 2 atm dan jumlah nosel 2 buah oleh data eksperimen diperoleh nilai penyimpangan rata-rata untuk: temperatur keluaran dingin sebesar 15%, selisih temperatur keluaran dingin sebesar 15% dan nilai penyimpangan rata-rata untuk fraksi dingin sebesar 20%.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ditujukan kepada LPPM Politeknik Negeri Bandung atas bantuan biaya penelitian ini melalui Program Penelitian Daya Saing KBK Tahun Anggaran 2013.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Suradi K. R, Samsul, Hermawan, *Simulasi Numerik Pengaruh Jumlah Nosel Terhadap Separasi Energi pada Ranque-Hilsch Tube Vortex*, Industrial Research Workshop and National Seminar-Politeknik Negeri Bandung, 2011.
- [2] Suradi K. R, *Analisis Fenomena Separasi Energi Ranque –Hilsch Tube Menggunakan Kaji Eksperimental dan Simulasi Numerik*, Tesis UGM, 2012.
- [3] Wood, B. D., *Application Of Thermodynamic*, Second Edition, Wesley Publishing, 1982.
- [4] Fluent Inc, *Guideline Document*, Centerra Resource Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766, 2006
- [5] Akhmesh, Pourmahmoud and Sedgi, *Numerical Study of the Temperature Separation in the Ranque-Hilsch VortexTube*, American Journal of Engineering and Applied Sciences, 2008.
- [6] Pourmahmoud, Akhesmesh, *Numerical Investigation of The Thermal Separation in a Vortex Tube*, World Academy of Science ,Engineering and Technology, 2008.
- [7] Nezhad H. A, and Shamsuddin R, *Numerical, Three Dimensional Analysis of The Mechanism of Flow and Heat Transfer in a Vortex Tube*, Thermal Sciences Vol 13, 2009.
- [8] Zin K.K, Hanskee A and Ziegler F, *Modeling and Optimization of the Vortex Tube with Computational Fluid Dynamic Analysis*, Energy Research Journal, 2010.