

Simulasi Numerik Pengaruh Jumlah Nozzle Terhadap Separasi Energi pada Ranque-Hilsch Tube Vortex

Radi Suradi K^{*,+}, Samsul *, Hermawan*

* Sekolah Pascasarjana Jurusan Teknik Mesin dan Industri
Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No. 2 Yogyakarta 55281, Telp dan Fax. (0274) 521673

+ Program Studi Teknik Aeronautika, Jurusan Teknik Mesin
Politeknik Negeri Bandung
Jl. Gegerkalong Hilir, Ds Ciwaruga, Bandung, Telp dan Fax (022) 2013789 dan 2013788
^{*,+} radisk@polban.ac.id

Abstrak

Paper ini membahas mengenai pengaruh jumlah nozzle pada vortex generator terhadap karakteristik aliran fluida yang terjadi didalam sebuah Ranque-Hilsch vortex tube jenis counter flow. Kajian dilakukan secara Numerik menggunakan perangkat lunak Numeca dengan variasi jumlah nosel dengan variasi fraksi debit massa dari aliran dingin. Kajian meliputi kecepatan swirl, kecepatan axial, kecepatan radial dan juga aliran sirkulasi balik beserta distribusi tekanan dan temperature yang terjadi didalam tabung vortex. Hasil kajian numerik menggunakan model aliran turbulen Spallart – Almaras extended wall function', dengan domain 3D. Dari hasil kajian ditampilkan properties aliran vortex dalam tabung dan juga visualisasi proses pemisahan energy fluida aliran dingin dan aliran panas.

Kata kunci: Ranque-Hilsch vortex tube, Numeca, silmulasion numerik, model aliran turbulen Spallart – Almaras, pemisahan energy.

1. Pendahuluan

Vortex tube yang dikenal dengan nama Hilsch atau Ranque tube (yang kemudian pada tesis ini disebut dengan RHTV, 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. Proses pemisahan dua aliran, dimana yang satu menjadi dingin dan yang satu menjadi panas bisa ditinjau sebagai proses pemisahan energy. Teori mengenai proses pemisahan energi umumnya didapat dari hasil experimental dan sebagian dari simulasi numerik. Sebagian dari hasil experimental tersebut menarik untuk dibahas dan dilaksanakan kembali. Salah satu proses uji eksperimental dan silmulasi numerik yang dilakukan pada tesis ini, adalah dengan menvariasikan parameter masukan seperti tekanan masuk P_i dan keluaran debit massa bagian dingin m_c dan panas m_h , juga geometri dari vortex tube, seperti banyaknya jumlah inlet nosel dari vortex generator yaitu $n=2$, $n=3$ dan $n=4$ dengan tetap mempertahankan jumlah luas penampang yang sama.

Fenomena separasi energi yang terjadi di dalam RHTV 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 bagaimana cara mendapatkan penurunan temperatur yang maximal, yang secara tidak langsung menunjukkan keoptimalan dari sebuah RHTV.

Perbedaan temperatur antara kedua arus yang keluar yang ditinjau sebagai proses pemisahan energi dapat dianggap berasal dari dua pengaruh (Wood, 1982 D) yaitu :

1. Terdapat gradien tekanan radial pada setiap vortex yang disebabkan oleh gaya sentrifugal pada fluida yang berputar, sehingga gas yang berada didekat sumbu tekanannya lebih rendah sementara gas yang berada dibagian dinding luar dimampatkan sehingga tekanan menjadi lebih besar.
2. Viskositas fluida mencegah terjadinya vortex yang benar-benar bebas dimana dari satu lapisan melingkar tidak terjadinya perpindahan energi kelapisan yang berikutnya (viskositas fluida cenderung menghasilkan vortex yang rapat atau yang dipaksa/forced dimana kemungkinan terjadinya perpindahan energi

dari lapisan dalam kearah lapisan luar, karena lapisan luar ini menahan kecepatan tangential lapisan dalam).

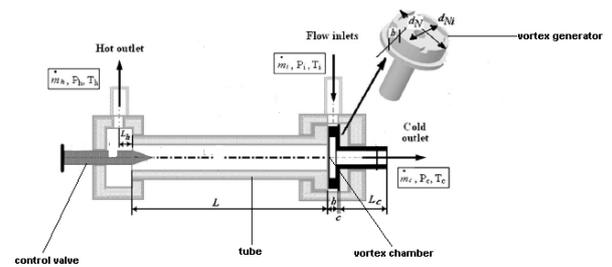
Berbagai cara telah dilakukan untuk mengetahui bagaimana separasi energi terjadi, ditinjau dari pengamatan aliran dalam yang terjadi ataupun mengukur secara teliti bagaimana perubahan dan distribusi temperature, tekanan ataupun kecepatan dari media kerja (udara, gas atau liquid) di sepanjang RHTV bagian per bagian. Metoda ini membutuhkan alat ukur dan peralatan yang lebih kompleks dari segi instalasi, seperti pemakaian probe tekanan hanya bisa mengukur distribusi tekanan kearah sumbu axial dari RHTV, tetapi tidak dapat kearah radial karena dapat mengganggu aliran. Pemakaian tube yang transparan seperti flexy glass dan menyuntikan cairan tambahan ataupun asap memungkinkan pengamatan secara visual bagaimana pola aliran didalam RHTV terjadi, tetapi itupun secara kualitatif (tidak terukur) (Gao, 2005). Metoda penelitian yang dilakukan untuk dapat mewakili studi RHTV secara bersamaan antara termodinamik dan fisik adalah dengan eksperimental dan silmulasi numerik. Pada paper ini data input dan output dari hasil experimental dipakai sebagai batasan yang akan dipakai pada metoda numerik. Proses meshing, pemilihan metoda turbulence dan assumsi lainnya agar hasilnya mendekati dengan hasil experimental adalah yang menjadi salah satu topic pada paper ini selain kajian dari hasil silmulasi numeriknya.

Ranque Hilsch Vortex tube dan variasi banyaknya nosel pada vortex generator yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut (lihat Gambar 1):

- Jenisnya adalah type counter flow, dengan diameter pipa 10 mm dan panjang 100mm.d
- Vortex generator seperti pada gambar 1 yang dipakai pada penelitian ini mempunyai karakteristik berapapun jumlah noselnya $n=2; n=3$; dan $n=4$, akan mempunyai jumlah luas area yang tetap.

Jumlah nozzle	Lebar Slot (mm)	Tinggi Slot (mm)	Jumlah luas Penampang (mm ²)
2	1.5	1.7	5.19
3	1	1.7	5.19
4	1	1.3	5.2

- Fraksi debit massa dingin diatur oleh klep keluaran aliran panas.
- Diameter orifice dingin 5mm.



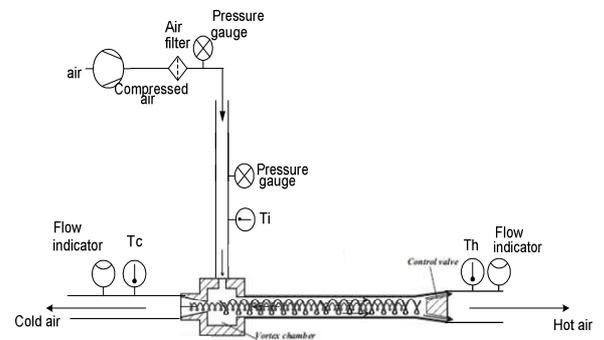
Gambar 1: Counter flow vortex tube dan bagian2nya

Tujuan penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut

- Mempelajari pengaruh jumlah nosel pada vortex generator terhadap proses separasi energi .
- Melaksanakan validasi dari perangkat lunak Numeca terhadap hasil experimental dan kemudian melihat perubahan berbagai properti fluida ketika proses separasi energi berlangsung

2.1 Proses Pengujian

Proses pengujian pengaruh banyaknya nosel terhadap separasi energy di RHTV terlihat seperti pada gambar 2.



Gambar 2: Skema pengujian RHTV counter flow

Prosedur pengujian yang di lakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Sumber udara bertekanan

- Tekanan udara keluar diatur tekanan kerjanya dari 2 bar sampai dengan 5 bar dengan spread 1 bar.

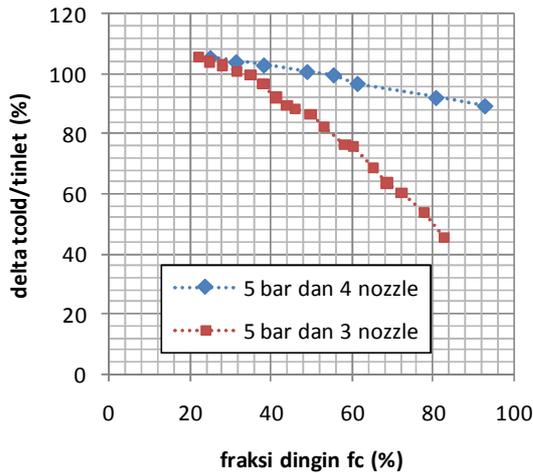
2. Flow control

- 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.

- Catat semua indicator dan buat tabel yang berisi hubungan: pendinginan dalam persen (beda penurunan temperature awal dan temperature dingin dibagi temperature awal) terhadap fraksi dingin.

3. Proses diulang untuk jumlah nosel yang berbeda dengan mengganti vortex nosel generator di vortex chamber.

Data hasil experimental ditampilkan dalam bentuk grafik pada gambar 3.



Gambar 3: Kurva pengujian pada kondisi 5 bar n = 3 dan n = 4

Terlihat pada nilai fraksi cold antara 24% sampai dengan 92%, penggunaan jumlah nozzle yang meningkat ternyata mempengaruhi gradient kurva diatas. Untuk jumlah nozzle 4 gradien kurva relatif konstan (kurva cenderung linier dibandingkan kurva nozzle 3 yang mempunyai gradient kurva yang berubah menuju negative yang besar) Kinerja vortex tube untuk pendinginan dengan jumlah nozzle 4 lebih baik daripada yang jumlah nozzlenya 3.

2.2. Proses Simulasi Numerik

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

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

Hukum kekekalan momentum dapat dituliskan dalam bentuk integral sebagai berikut

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \vec{U} dV + \iint_A (\rho \vec{U} \cdot d\vec{A}) \vec{U} = \\ - \iint_A P d\vec{A} + \iiint_V \rho \vec{f} dV + \vec{F}_{viscous} \end{aligned} \quad (2)$$

Hukum kekekalan energi dapat dituliskan dalam bentuk integral sebagai berikut

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

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 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 *Spallart Allmaras (S-A)* yang dirancang khusus untuk bidang penerbangan. Model S-A merupakan model turbulensi yang sederhana karena hanya mempunyai satu persamaan yang dicari jawabnya yaitu dalam bentuk persamaan gerak kekentalan kinematik *Eddy (turbulent kinematic viscosity)*.

Model S-A merupakan model untuk memecahkan persamaan gerak (1, 2 dan 3) dalam bentuk kuantitas modifikasi kekentalan kinematik turbulen $\bar{\nu}$, yang dapat dituliskan sebagai berikut

$$\begin{aligned} \rho \frac{D\bar{\nu}}{Dt} = G_\nu + \\ \frac{1}{\sigma_\nu} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho \bar{\nu}) \frac{\partial \bar{\nu}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \bar{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_\nu \end{aligned} \quad (4)$$

dimana G_ν adalah kekentalan turbulen yang dihasilkan, Y_ν adalah destruksi kekentalan turbulen, σ_ν dan C_{b2} adalah konstanta dan ν adalah kekentalan kinematik molekul udara.

Kekentalan turbulen μ_t dapat dituliskan sebagai berikut

$$\mu_t = \rho \bar{\nu} f_{vl} \quad (5)$$

$$f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}} \text{ dan } \chi = \frac{\bar{v}}{v} \quad (6)$$

dimana f_{v1} adalah peredam kekentalan.

Model produksi turbulen dapat dituliskan sebagai berikut

$$G_v = C_{b1} \rho \bar{S} \bar{v} \quad (7)$$

$$\bar{S} = S + \frac{\bar{v}}{\kappa^2 d^2} f_{v2} \quad (8)$$

$$f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi^{f_{v1}}} \quad (9)$$

dimana C_{b1} dan κ adalah konstanta, \bar{d} adalah jarak dari dinding dan S adalah skalar berdasarkan besar *vorticity*, yang dapat dituliskan sebagai berikut.

$$S = \sqrt{\Omega_{ij} \Omega_{ij}} + 2 \min(0, \sqrt{S_{ij} S_{ij}} - \sqrt{\Omega_{ij} \Omega_{ij}}) \quad (10)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (11)$$

Model destruksi turbulen Y_v dapat dituliskan sebagai berikut

$$Y_v = C_{w1} \rho f_w \left(\frac{\bar{v}}{d} \right)^2 \quad (12)$$

$$f_w = g \left(\frac{1 + C_w^3}{g^6 + C_w^6} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (13)$$

$$g = r + C_{w2} (r^6 - r) \quad (14)$$

$$r = \frac{\bar{v}}{S \kappa^2 d^2} \quad (15)$$

Nilai konstanta yang ada didalam model turbulen Spalart Allmaras adalah sebagai berikut; $C_{b1} = 0.1335$, $C_{b2} = 0.622$, $\sigma_v = 2/3$,

$$\kappa = 0.41 \quad C_{v1} = 7.1, \\ C_{w1} = (C_{b1}/\kappa^2) + (1 + C_{b2}/\sigma_v), \quad C_{w2} = 0.3 \\ C_{w3} = 2.0.$$

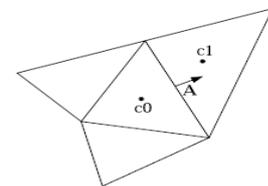
Untuk kondisi aliran tunak (*steady*), jika variabel tak bebas ϕ adalah fungsi ruang $\phi = f(x, y, z)$ yang tidak diketahui adalah solusi dari persamaan model gerak fluida (persamaan 1, 2 dan 3) serta persamaan model turbulen Spalart Allmaras (persamaan 4) dan ϕ merupakan kuantitas skalar (tekanan, densitas dan sejenisnya) atau kuantitas kecepatan, maka persamaan (1,2,3 dan 4) dapat dituliskan dalam bentuk persamaan yang mengandung ϕ sebagai berikut

$$\iiint_A \rho \phi \bar{U} \cdot d\bar{A} = \iiint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\bar{A} + \iiint_V S_\phi dV \quad (16)$$

dimana Γ_ϕ adalah koefisien difusi dari variabel ϕ , $\nabla \phi$ adalah gradient ϕ dan S_ϕ adalah sumber dari ϕ persatuan volume. NUMECA menggunakan teknik kendali volume (*control volume*) untuk mengubah persamaan (16) kedalam bentuk persamaan aljabar yang dapat dicari solusinya.

Untuk mendapatkan bentuk aljabar dari persamaan (16), maka dilakukan-langkah sebagai berikut. Langkah pertama adalah melakukan diskretisasi persamaan 16 yang langkah selanjutnya adalah mengubah persamaan diskret menjadi bentuk aljabar.

Pada diskretisasi untuk mendapatkan solusi ϕ , maka domain kontinu diubah menjadi domain diskret dalam bentuk cell 2D yaitu segiempat atau segitiga (*quadrilateral cell* atau *triangular cell*), sebagai contoh digunakan cell segitiga seperti tampak pada Gambar 4.



Gambar 4 : Ilustrasi control volume menggunakan cell segitiga untuk diskretisasi

Sehingga persamaan (16) dalam domain kontinu diubah dalam bentuk *domain diskret* (diskontinu) yang dapat dituliskan sebagai berikut

$$\sum_f^{N_{face}} \bar{U}_f \phi_f A_f = \sum_f^{N_{face}} \Gamma_\phi (\nabla \phi)_n A_f + S_\phi V \quad (17)$$

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

Nilai ϕ yang diperoleh dari komputasi disimpan pada pusat *cell grid* yaitu titik $c_0, c_1 \dots c_n$ di dalam Gambar 3 dan nilai ϕ_f dibutuhkan untuk mengkonveksi bentuk persamaan 17 dengan cara interpolasi nilai-nilai pusat cell.

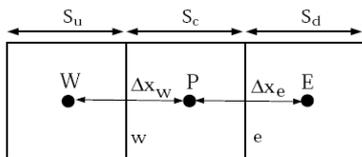
Untuk mendapatkan nilai ϕ_f , maka dapat dilakukan dengan menggunakan skema *upwind*. Skema *upwind* yang digunakan adalah derajat dua untuk mendapatkan tingkat akurasi yang lebih tinggi. Berdasarkan pendekatan deret Taylor, maka nilai ϕ_f dapat dituliskan sebagai berikut

$$\phi_f = \phi + \nabla\phi \cdot \vec{dr} \tag{18}$$

$$\nabla\phi = \frac{1}{V} \sum_f^{N_{face}} \phi_f \vec{A} \tag{19}$$

dimana ϕ dan $\nabla\phi$ 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 ϕ_f adalah nilai rata-rata ϕ yang dihitung dari dua cell yang dipisahkan oleh muka cell yang sama.

Ilustrasi persamaan (18) untuk tipe cell segiempat dengan pusat cell adalah W, P dan E dan muka cell w dan e seperti tampak pada Gambar 5.

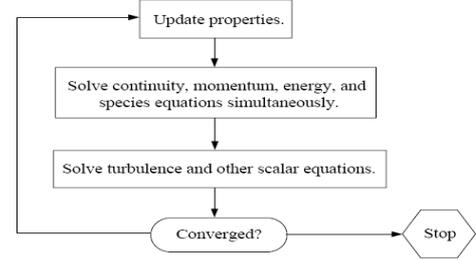


Gambar 5 : Kontrol volume menggunakan quadrilateral grid

Berdasarkan Gambar 2.6, maka dapat ditentukan nilai ϕ pada muka e yaitu ϕ_e yang dapat dituliskan sebagai berikut

$$\phi_e = \frac{S_u + 2S_c}{S_u + S_c} \phi_P - \frac{S_c}{S_u + S_c} \phi_W \tag{20}$$

Untuk mendapatkan solusi ϕ maka dilakukan dengan metode *couple*, diagramnya dapat digambarkan seperti tampak pada Gambar 6.



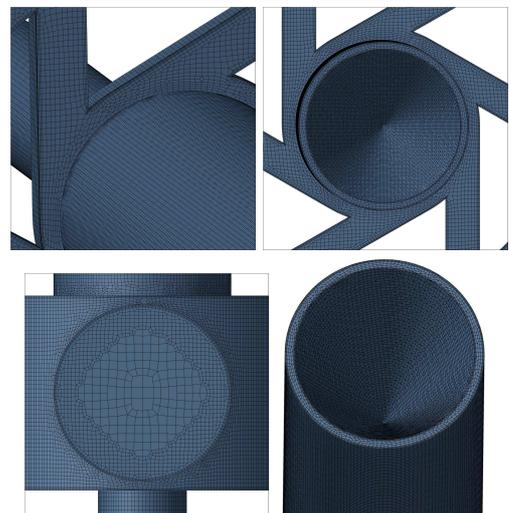
Gambar 6 : Diagram alir solusi dengan metode couple

Geometri vortex tube seperti tampak pada Gambar 7



Gambar 7: Geometri vortex tube

Meshing grid domain komputasi vortex menggunakan jenis meshing segiempat. Domain komputasi yang telah di meshing, seperti tampak pada Gambar 8.



Gambar 8: Meshing domain komputasi vortex tube

Jumlah mesh total yang digunakan adalah sekitar 2 juta mesh.

2.3. Teknik Analisis

Kaji silmulasi numerik aliran di dalam vortex tube menggunakan model turbulensi Spalart Allmaras pada RHTV counter flow dengan tiga dan empat inlet (empat nozzle), seperti tampak pada Gambar 9 dan Gambar 10, yang menunjukkan kontur

kecepatan aliran berputar (*swirl flow*) yang lebih besar pada dekat dinding dibandingkan aliran pada pusat vortex tube. Hasil ini diperkuat dan telah dilakukan oleh **Saeid dkk (2008)** dan **N.Pourmahmoud dkk(2008)**, **Alireza dkk(2010)**, **K.K.Zin(2010)** dengan menggunakan model turbulensi k-ε.

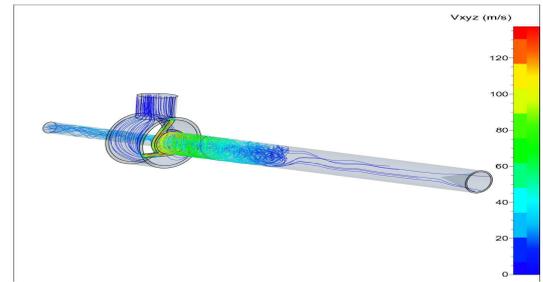
Hasil yang didapat adalah terlihat adanya:

- *hot peripheral flow* dan bersamaan dengan pusaran aliran balik dingin balik pada sumbu tube kearah keluaran dingin.
- maximum kecepatan pada daerah sekitar dinding dan arah alirannya menuju ke keluaran panas, dan nilainya menurun sesuai dengan panjang dari tube sedangkan kecepatan axial aliran dingin malah naik kearah keluran dingin.
- besaran kecepatan pusaran lebih besar dua kali lipat.dibanding kecepatan axial,dan besarnya menurun ketika menuju daerah keluaran panas.
- Fluida pada daerah sumbu mempunyai energi kinetik yang rendah karena rendahnya kecepatan pusaran pada daerah tersebut.

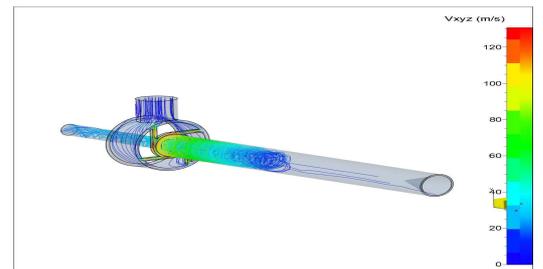
M.Ameri dkk (2009), Penggunaan ‘steady axisymmetric (with swirl) CFD model’ dengan memakai RSM turbulensi model pada RHTV dengan jumlah dan bentuk nozzle. Hasil yang didapat adalah:

- Kecepatan pusaran maximum terjadi pada daerah tepat keluaran Nozzle.
- Distribusi temperature statik pada RHTV menurun sesuai dengan menurunnya jari-jari,dan naik secara drastis ketika dekat dinding tube.(lihat gambar 11 dan 12)
- Distribusi temperatur pada jari-jari yang sama akan menaik menuju kearah keluaran panas.(lihat gambar 11 dan 12).
- Vortex Tube dengan banyak inlet nozzle dan nozzle nya konis akan menghasilkan RHTV dg efisiensi yang tinggi dan hasil tersebut dapat dicapai bila Mach number mencapai 1 pada outlet nozzle.
- Menghasilkan kesimpulan bahwa separasi energi terjadi karena adanya ”transfer of shear work” yang disebabkan oleh perubahan kecepatan tangensial secara radial dari daerah sumbu ke daerah luar dengan perubahan rerata energi kinetik anatar pusat vortex tube dengan dinding vortex tube yang memungkinkan terjadi pemisahan aliran di dalam vortex tube.

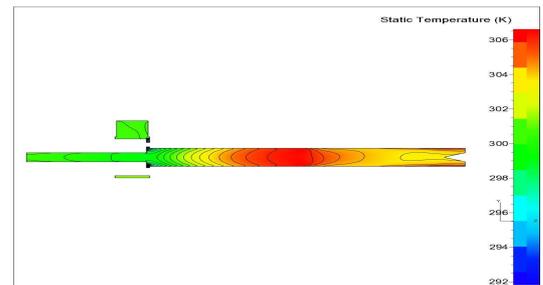
2.3.1. Nozzle 3, fraksi cold 10%



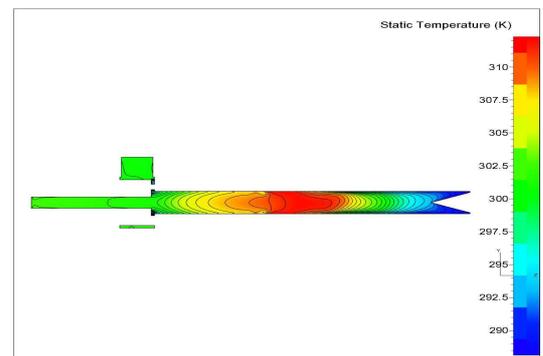
Gambar 9: Streamline kecepatan aliran swirl di dalam vortex tube 3 nozzle dan fc 10% dengan model turbulensi Spalart Allmaras.



Gambar 10 : Streamline kecepatan aliran swirl di dalam vortex tube 4 nozzle dan fc 10% dengan model turbulensi Spalart Allmaras.



Gambar 11: Distribusi Temperatur Statik pada bidang tengah vortex tube 4 nozzle dan fc 10% dengan model turbulensi Spalart Allmaras



Gambar 12: Distribusi Temperatur Statik pada bidang tengah vortex tube 3 nozzle dan fc 10% dengan model turbulensi Spalart Allmaras

Kesimpulan

- Jumlah nozzle 4 menghasilkan kinerja pendinginan yang lebih baik dari jumlah nozzle 3.
- Model turbulensi Spalart Allmaras dapat mensimulasikan penemomena pemisahan aliran dingin dan aliran panas yang melalui vortex tube untuk kondisi jumlah nozzle 3 dan 4 yang sesuai dengan hasil pengujian.

Daftar Pustaka

- Alireza Hossein Nezhad and Rahim Shamsuddin,2009, *Numerikal,Three Dimensional Analysis of The Mechanism of Flow and Heat Transfer in a Voretex Tube*, Thermal Sciences Vol 13.
- K.K.Zin ,A.Hanskee and F.Ziegler,2010, *Modeling and Optimization of the Vortex Tube with Computational Fluid Dynamic Analysis*,EnergyResearch Journal.
- Gao,Chengming ,2005, *Experimental Study on the Ranque-HilchVortex Tube*, PhD Dissertation, Technische Universiteit Einhoven,
- Mohammad Ameri,Behrooz Behnia,2009, *The study of Key Design Parameter Effect on the Vortex Tube Performance*, Journal of Thermal Science.
- N.Pourmahmoud,S.Akhesmesh ,2008, *Numerical Investigation of The Thermal Separation in a Vortex Tube*, World Academy of Science ,Engineering and Technology.
- Saeid Akhemes, Nader Pourmahmoud and Hasan Sedgi,2008, *Numerikal Study of the Temperature Separation in the Ranque-Hilsch VortexTube*, American Journal of Engineering and Applied Sciences
- Sachin U. Nimbalkar *, Michael R. Muller,2008, *An Experimental Investigation of the optimum geometry for the cold endorifice of Vortex Tube*, AppliedThermal Engineering,Elsevier.
- Wood,Bernard D ,1982, *Application Of Thermodynamic*,Wesley Publshing, Second Edition