

# PENGARUH SUNTIKAN UDARA PADA ALIRAN PUSAR SEKUNDER TERHADAP KAPASITAS PENDINGINAN KELUARAN TABUNG VORTEX

Faldian<sup>+</sup>, I Made Suardjaja\*, Prajitno\*

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

<sup>+</sup> Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara  
Politeknik Negeri Bandung  
Jl. Gegerkalong Hilir, Ds Ciwaruga, Bandung, Telp dan Fax (022) 2013789 dan 2013788  
E-mail : fld\_ra@yahoo.com

## ABSTRAK

*Tabung vortex merupakan salah satu sistem refrigerasi yang menggunakan udara bertekanan sebagai fluida kerja masukan yang menghasilkan ekspansi dengan separasi udara keluaran bertemperatur lebih rendah dan udara keluaran bertemperatur lebih tinggi yang berlangsung pada tabung yang sama. Kapasitas pendinginan yang kecil merupakan salah satu kekurangan pada sistem pendingin tabung vortex*

*Upaya untuk meningkatkan kapasitas pendinginan pada tabung vortex tanpa mengubah konstruksi dan tanpa mengubah dimensinya, dilakukan dengan cara menyuntikkan sejumlah udara pada daerah terbentuknya aliran pusar udara sekunder melalui katup sumbat (hot end plug) yang dilubangi pada bagian tengahnya.. Penyuntikan sejumlah udara dilakukan tanpa menjadi arus aliran udara balik pada keluaran udara panas. Eksperimen ini menggunakan suatu model tabung vortex dengan diameter nominal tabung 12,7 mm dan panjang tabung 100 mm, sedangkan nosel untuk pembangkit vortex menggunakan 3 alur masukan dengan geometrik alur persegi*

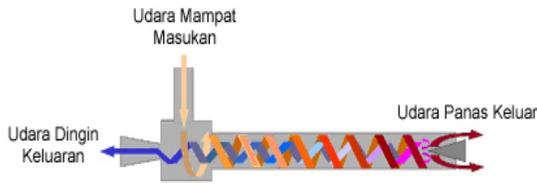
*Hasil dari penelitian menunjukkan batas penurunan temperatur terjadi hingga mencapai fraksi massa udara dingin  $\mu_c = 0,66$  pada tekanan udara masukan  $5 \text{ kg/mm}^2$  fraksi massa udara dingin  $\mu_c = 0,66$  pada tekanan udara masukan  $4 \text{ kg/mm}^2$  dan fraksi massa udara dingin  $\mu_c = 0,54$  pada tekanan udara masukan  $3 \text{ kg/mm}^2$ . Demikian pula kenaikan kapasitas pendinginan bervariasi terhadap tekanan masukan dapat mencapai 57%.*

**Kata kunci:** Tabung vortex, kapasitas pendinginan, suntikan udara, penurunan temperatur, temperatur separasi

## PENDAHULUAN

Tabung vortex (*Vortex Tube*) merupakan salah satu sistem refrigerasi non konvensional yang mengubah energi potensial dari aliran udara mampat masukan yang kemudian diekspansikan menjadi separasi aliran udara keluaran berpusar sekunder bertemperatur yang lebih rendah (*inner vortex*) dan keluaran aliran udara berpusar primer yang bertemperatur lebih tinggi (*outer vortex*) yang berlangsung di dalam tabung secara bersamaan, dimana dalam prosesnya tidak terdapat peralatan yang bergerak. Fenomena separasi

dari udara mampat yang menghasilkan keluaran ekspansi udara panas dan keluaran ekspansi udara dingin, pertama kali dikemukakan oleh G.J.Ranque pada tahun 1930 dan kemudian diinvestigasikan oleh Hilch pada tahun 1947 untuk menentukan performansi tabung vortex (Gao, 2005). Keluaran udara dingin dapat dimanfaatkan sebagai sistem pendinginan, sedangkan keluaran udara panas dapat dimanfaatkan sebagai sistem pemanasan.



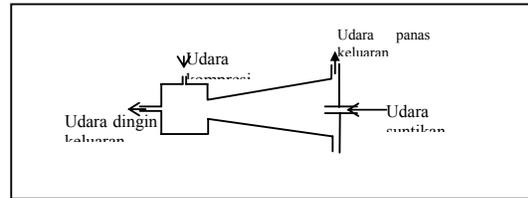
Gambar 1: Prinsip tabung vortex

Energi yang dibutuhkan untuk mengoperasikan tabung vortex berupa udara mampat, tanpa menggunakan sumber energi listrik, tanpa menggunakan refrigeran sehingga ramah terhadap lingkungan serta tanpa adanya komponen yang bergerak ataupun yang berputar. Konstruksi yang sederhana, berdimensi kecil, ringan, murah mudah mengatur temperatur keluaran serta hampir tidak memerlukan perawatan merupakan keunggulan pada sistem pendinginan tabung vortex. Penggunaan sistem pendinginan tabung vortex umumnya sebagai *spot cooling* untuk pendinginan suatu proses, pendinginan suatu komponen mesin atau peralatan yang sedang beroperasi serta pendinginan pada proses pemesinan. Efisiensi yang kecil dan kapasitas pendinginan yang kecil merupakan keterbatasan pada penggunaan sistem pendingin tabung vortex.

Kapasitas pendinginan tabung vortex merupakan fungsi dari penurunan temperatur udara dingin keluaran dan laju aliran massa udara dingin keluaran. Pengaturan temperatur dingin keluaran pada suatu tabung vortex dilakukan dengan mengubah bukaan katup sumbat keluaran gas panas (*hot end plug*) dan secara bersamaan terjadi pula perubahan laju aliran massa udara dingin keluaran. Semakin rendah pengaturan temperatur keluaran, maka laju aliran massa dingin keluaranpun akan semakin mengecil, begitu pula sebaliknya, untuk meningkatkan laju aliran udara dingin keluaran yang lebih besar akan mengakibatkan temperatur keluaran udara dingin akan meningkat. Untuk meningkatkan laju aliran massa keluaran udara dingin yang lebih besar dapat dilakukan dengan menggabungkan secara paralel terhadap beberapa buah tabung vortex atau dapat pula memilih tabung vortex dengan dimensi atau kapasitas yang lebih besar, tetapi akan terjadi penambahan peralatan atau akan mengubah spesifikasi atau dimensi tabung vortex.

Upaya untuk meningkatkan efisiensi adiabatik dan kapasitas pendinginan tabung vortex dengan suatu modifikasi tanpa mengubah dimensi dan konstruksi utama tabung vortex telah dilakukan oleh Piralishvili dan Polyayev (1996). Dalam penelitiannya dibuatlah sirkuit kedua pada sistem tabung vortex (*double circuit vortex tube*) yakni dengan mengambil sebagian dari udara mampat masukan, kemudian disuntikkan ke daerah awal terbentuknya aliran berpusar udara sekunder. Suntikan sejumlah udara pada sirkuit kedua (*feed back air*) dimasukkan dengan cara melubangi

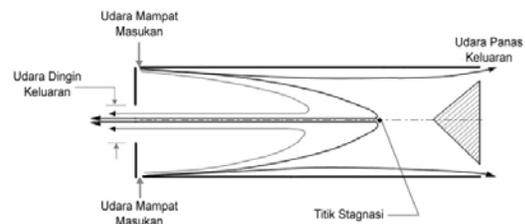
bagian tengah katup sumbat keluaran gas panas. Udara suntikan yang diambil dari sebagian dari udara mampat masukan terlebih dahulu perlu dilakukan suatu proses penurunan tekanan yang sesuai dengan tekanan pada daerah stagnasi aliran berpusar udara sekunder pada temperatur tertentu.



Gambar 2: Skema prinsip penyuntikan udara (*double circuit vortex tube*). (Piralishvili, 1996)

Penelitian dilakukan dengan menggunakan suatu model tabung vortex dengan geometrik tabung konis dengan berbagai variasi sudut konis. Pada diameter tabung  $D = 30 \text{ mm}$ , dan perbandingan antara panjang tabung dengan diameter tabung,  $L/D = 9$  pada penelitiannya, merupakan suatu kondisi yang paling optimum yang terjadi pada sudut konis tabung  $3^\circ$ . Tekanan udara mampat masukan 4 barg dan temperatur  $20^\circ \text{ C}$ . Penurunan temperatur maksimum  $\Delta T_{d, \text{maks}}$  sebesar  $44^\circ \text{ C}$  pada fraksi massa dingin  $\mu_t = 0,5$  dengan efisiensi adiabatik  $\eta = 20 \%$  serta gap katup sumbat,  $\delta$  sebesar 10 mm. Efisiensi adiabatik maksimum  $\eta_{\text{maks}}$  sebesar 33 % terjadi pada fraksi massa dingin  $\mu_t = 0,9$  dengan penurunan temperatur  $\Delta T_d$  sebesar  $38^\circ \text{ C}$ . Penurunan temperatur maksimum terjadi pada rentang  $0,4 < \mu_t < 0,5$  sedangkan efisiensi adiabatik maksimum terjadi pada rentang  $0,8 < \mu_t < 1,0$ .

Pemasukan udara suntikan diupayakan sedekat mungkin dengan daerah awal terbentuknya aliran berpusar udara sekunder (*stagnation point*). Bramo (2006) melakukan salah satu studi numerik terhadap daerah stagnasi pada tabung vortex dengan berbagai perbandingan antara panjang tabung dengan diameter tabung,  $L/D$ . Panjang daerah stagnasi (*stagnation point*) terhadap panjang tabung maksimum  $Z/L = 0,985$  terjadi pada kondisi  $L/D = 9,3$  dengan panjang tabung,  $L = 104 \text{ mm}$ . Semakin besar nilai  $L/D$ , semakin kecil nilai  $Z/L$  atau jarak antara titik stagnasi dengan ujung katup sumbat semakin menjauh.



Gambar 3. Penunjukan titik stagnasi pada tabung vortex (Bramo, 2006)

Berdasarkan hukum konservasi massa, laju aliran massa udara masukan  $\dot{m}_m$  sama dengan jumlah laju aliran udara panas keluaran  $\dot{m}_p$  dengan laju aliran udara dingin keluaran  $\dot{m}_d$ , atau :

$$\dot{m}_m = \dot{m}_d + \dot{m}_p ..$$

Apabila fraksi udara dingin  $\mu_d$  didefinisikan sebagai perbandingan antara aliran udara dingin keluaran  $m_d$  dengan aliran udara mampat masukan  $\dot{m}_m$  atau disebut sebagai fraksi massa udara dingin :  $\mu_d$ , sedangkan penurunan temperatur udara dingin keluaran dinyatakan dengan  $\Delta T_d$ , kenaikan temperatur udara panas keluaran dinyatakan dengan  $\Delta T_p$  dan perbedaan antara temperatur keluaran panas dengan temperatur keluaran dingin dinyatakan dengan  $\Delta T$ , maka

$$\mu_d = \frac{m_d}{m_m}$$

dan

$$\Delta T_d = T_m - T_d$$

sedangkan

$$\Delta T_p = T_p - T_m$$

Besarnya kapasitas pendinginan sensibel akibat ekspansi separasi tabung *vortex*  $Q_{v,i}$  adalah :

$$Q_v = m_d \cdot c_p \cdot \Delta T_d .....$$

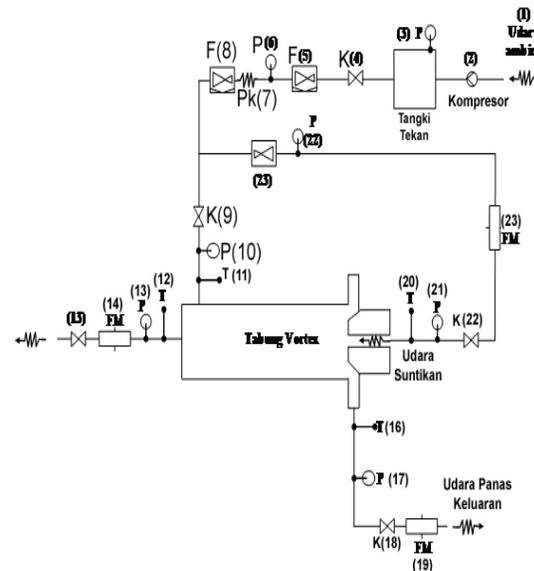
**METODA PENELITIAN**

Eksperimen dilaksanakan dengan mempergunakan sebuah model tabung *vortex* dengan geometri tabung silindris, diameter nominal tabung 12,7 mm atau diameter dalam tabung 10,4 mm serta panjang tabung 100 mm atau L/D = 9,6.. Geometris katup sumbat berbentuk konis dengan sudut kerucut 40° dan terdapat lubang pada bagian tengahnya untuk masuknya udara suntikan dengan diameter lubang d = 3 mm. Pembangkit vortex menggunakan nosel konvensional berpenampang persegi, berukuran 1 mm x 1,7 mm dengan 3 alur nosel.

Penelitian ini akan melihat fenomena yang terjadi terhadap peningkatan kapasitas pendinginan dari suatu model tabung vortex akibat adanya masukan udara dengan sengaja pada daerah aliran pusar udara sekunder tanpa terjadi gangguan atau arus balik udara suntikan pada aliran keluaran udara panas. Gambar 4 memperlihatkan skema dari instalasi pengujian. Udara ambien (1) dimampatkan oleh kompresor (2) hingga mencapai tekanan 7 bar kemudian ditampung terlebih dahulu pada tangki tekan (3) untuk meratakan tekanan. Setelah ke luar tangki tekan diperlukan komponen tambahan seperti katup blokir K(4),

pressure regulator dan *air separator* F(5) untuk mengatur tekanan masuk ke tabung vortex dan mengeluarkan uap air yang terkandung pada aliran udara mampat sesuai yang diinginkan dan tekanan keluaran yang dipantau oleh pressure gauge P(6). Udara mampat sebelum digunakan didinginkan terlebih dahulu oleh penukar kalor PK(7) untuk menstabilkan temperatur udara masukan ke tabung vortex kemudian uap air yang masih terkandung dalam udara di pisahkan lagi pada *air sparator* F(8). Setelah melewati *air sparator* F(8) udara mampat dipisahkan menjadi dua bagian masing masing menuju tabung vortex dan yang lainnya menuju ke bagian saluran udara suntikan. Aliran sparasi udara dingin keluar ke udara ambien dengan pantauan temperatur dingin T(16) pada tekanan P(17) dan debit FM(14). Aliran sparasi udara panas keluar ke udara ambien dengan pantauan temperatur T(16), pada tekanan P(17) dengan debit keluaran FM (19). Pada kondisi dimana terjadi pemasukan udara suntikan ,tekanan udara suntikan masukan diatur oleh katup pengatur tekanan (25) dengan pantauan tekanan P(24). Tekanan udara stagnasi dipantau oleh perssure gauge P(21) dengan cara menutup katup K(22), sedangkan aliran udara suntikan pada saat dimasukkan dipantau dengan temperatur T(20) dengan debit FM(23).

Pengambilan data awal dilakukan dengan mengatur suatu posisi katup untuk memperoleh debit keluaran udara dingin atau fraksi massa udara dingin yang paling minimum tanpa udara suntikan. Berikutnya setiap pengaturan suatu posisi bukaan katup sumbat untuk mengatur temperatur keluaran awal atau debit keluaran udara dingin awal tanpa udara suntikan , diikuti dengan pemasukan udara suntikan secara bertahap.



Gambar 4. Skema instalasi pengujian

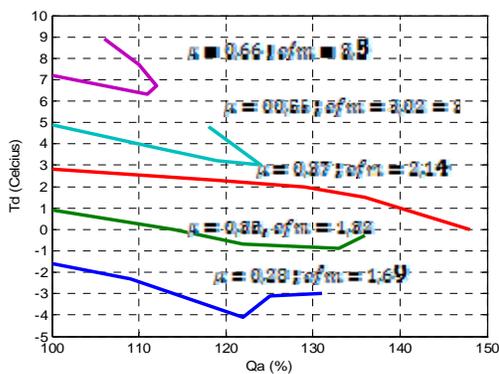
Pemasukan sejumlah udara suntikan akan menurunkan temperatur udara dingin keluaran dan juga terjadi kenaikan debit udara dingin keluaran, tetapi pemasukan udara suntikan dibatasi hingga terjadi arus udara balik pada udara panas keluaran, yang ditandai dengan terjadi kenaikan debit udara panas keluaran. Pengaturan posisi bukaan katup sumbat maksimal pada tekanan udara mampat masukan tertentu terjadi apabila efek penurunan temperatur tidak terjadi lagi apabila dilakukan pemasukan udara suntikan atau terjadi arus balik udara keluaran panas. Tekanan udara masukan pada penelitian ini divariasikan pada masing-masing tekanan 3 kg/cm<sup>2</sup>, 4 kg/cm<sup>2</sup> dan 5 kg/cm<sup>2</sup>.

Data yang diperoleh dari pengukuran pada setiap tekanan masukan udara mampat dan pada setiap posisi bukaan katup sumbat dengan dan tanpa pemasukan udara suntikan berupa tekanan udara mampat masukan, P<sub>m</sub>, debit udara dingin keluaran,  $\dot{V}_d$ , debit udara panas keluaran,  $\dot{V}_p$ , debit udara suntikan  $\dot{V}_s$ , temperatur udara mampat masukan T<sub>m</sub>, temperatur udara dingin keluaran, T<sub>d</sub>, temperatur udara panas keluaran, T<sub>p</sub>, tekanan udara dingin keluaran, P<sub>d</sub>, tekanan udara panas keluaran, P<sub>p</sub>, tekanan udara suntikan masukan, P<sub>s</sub> dan temperatur udara suntikan masukan, T<sub>s</sub>.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada penelitian ini udara mampat masuk dijaga konstan pada temperatur 27,5°C pada setiap pengambilan data, baik pada saat sebelum dan pada saat pemasukan terhadap udara suntikan

**Tekanan udara mampat masukan pada tekanan 5 kg/cm<sup>2</sup>**



Gambar 5. Grafik prosentase Kapasitas pendinginan terhadap penurunan temperatur udara dingin pada tekanan masukan P<sub>m</sub> = 5 kg/cm<sup>2</sup>

Gambar . 5 memperlihatkan grafik hasil pengolahan data pada tabung vortex antara kapasitas pendinginan dengan penurunan temperatur keluaran udara dingin akibat pemasukan udara suntikan.

Pertama katup sumbat diatur untuk memperoleh udara dingin keluaran terendah tanpa pemasukan udara suntikan pada fraksi massa udara dingin awal  $\mu_d = 0,28$  atau pada debit udara dingin keluaran awal  $\dot{V}_d = 1,69$  SCFM<sub>d</sub> dan diperoleh temperatur keluaran udara dingin T<sub>d</sub> = -1,6°C dengan kapasitas pendinginan keluaran  $\dot{Q}_d = 26,97$  watt . Kemudian dimasukkan udara suntikan secara bertahap, terjadi penurunan temperatur dingin terendah pada 4,1°C dan kenaikan kapasitas pendinginan 22%. . Pemasukan udara suntikan berikutnya akan menaikkan temperatur keluaran udara dingin dan batas akhir pemasukan udara suntikan terjadi pada temperatur dingin keluaran T<sub>d</sub> = -3,0°C dan masih lebih rendah dari temperatur keluaran udara dingin awal, sedangkan kenaikan kapasitas pendinginan mencapai 31%. Penambahan udara suntikan berikutnya akan mengakibatkan terjadinya arus balik sebagian dari udara suntikan ke udara panas keluaran atau sudah mencapai batas pemasukan udara suntikan maksimum.

Pengaturan katup sumbat berikutnya dengan mengatur debit udara dingin keluaran awal  $\dot{V}_d = 1,32$  SCFM<sub>d</sub> atau pada fraksi massa udara dingin awal  $\mu_d = 0,35$  dan temperatur awal keluaran tanpa udara suntikan sebesar 0,9°C, dengan kapasitas pendinginan keluaran  $\dot{Q}_d = 30,83$  watt Pemasukan udara suntikan akan menurunkan temperatur dingin keluaran terendah pada temperatur -0,9 °C dan kenaikan kapasitas pendinginan 33%. Batas akhir pemasukan udara suntikan terjadi pada temperatur dingin keluaran T<sub>d</sub> = -0,3°C dengan terus meningkatnya kenaikan kapasitas pendinginan hingga mencapai 36 %.

Berikutnya katup sumbat diatur pada debit udara dingin keluaran awal  $\dot{V}_d = 2,14$  SCFM atau pada fraksi massa udara dingin awal  $\mu_d = 0,37$  dengan temperatur keluaran awal tanpa udara suntikan sebesar 2,8°C, dengan kapasitas pendinginan keluaran  $\dot{Q}_d = 34,34$  watt . Pemasukan udara suntikan akan terus menurunkan temperatur dingin hingga mencapai temperatur terendah 0 °C dan kenaikan kapasitas pendinginan maksimal terjadi sebesar 48% dan juga merupakan batas akhir pemasukan udara suntikan.

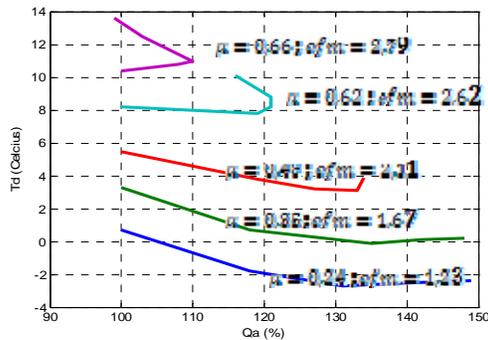
Pada pengaturan katup sumbat dengan debit udara dingin keluaran awal  $\dot{V}_d = 3,02$  SCFM atau pada fraksi massa udara dingin awal  $\mu_d = 0,55$  dengan temperatur keluaran awal tanpa udara suntikan sebesar 4,9°C, dengan kapasitas pendinginan keluaran  $\dot{Q}_d = 36,66$  . Penurunan temperatur keluaran dingin akibat udara suntikan terus terjadi hingga mencapai temperatur 3 °C dengan kenaikan prosentase kapasitas pendinginan sebesar 24 %. Kenaikan udara suntikan berikutnya akan mencapai batas pemasukan udara suntikan maksimal terjadi pada temperatur 4,8 °C dengan, prosentase kapasitas pendinginan hanya 18%

dari kapasitas pendinginan awal. Dibandingkan kurva sebelumnya terjadi perbedaan seperti terlihat pada grafik akan terlihat prosentase penurunan kapasitas pendinginan. Hal ini disebabkan oleh kenaikan temperatur dingin udara keluaran yang mendekati temperatur dingin keluaran awal sehingga kurva berbalik arah, hal ini disebabkan oleh nilai kapasitas pendinginan merupakan fungsi dari penurunan temperatur udara keluaran dingin dan debit udara dingin keluaran.

Debit udara dingin keluaran awal berikutnya pada  $\dot{V}_d = 3,5$  SCFM atau pada fraksi massa udara dingin awal  $\mu_d = 0,66$  mempunyai temperatur keluaran awal tanpa udara suntikan sebesar  $7,2^\circ\text{C}$ , dengan kapasitas pendinginan keluaran  $\dot{Q}_d = 37,63$  watt. Penurunan temperatur keluaran dingin akibat udara suntikan pun terus terjadi hingga mencapai temperatur  $6,3^\circ\text{C}$  dengan kenaikan prosentase kapasitas pendinginan sebesar 11%. Kenaikan udara suntikan lanjutan akan meningkatkan temperatur udara dingin keluaran di atas temperatur udara keluaran dingin awal tanpa suntikan hingga mencapai temperatur  $8,9^\circ\text{C}$  pada prosentase kenaikan kapasitas pendinginan menjadi turun menjadi 6%. Temperatur dingin keluaran yang lebih tinggi menyebabkan terjadinya penurunan kapasitas pendinginan keluaran dan kurva pun berbalik arah.

**Tekanan udara mampat masukan pada tekanan 4 kg/cm<sup>2</sup>**

Pada gambar 6 memperlihatkan grafik hasil pengolahan data pada tabung vortex antara kapasitas pendinginan dengan penurunan temperatur keluaran udara dingin akibat suntikan pada tekanan 4 kg/cm<sup>2</sup>..



Gambar 6. Grafik prosentase Kapasitas pendinginan terhadap penurunan temperatur udara dingin pada tekanan masukan  $P_m = 4 \text{ kg/cm}^2$

Secara prinsip bentuk kurva keseluruhan pada grafik untuk tekanan 4 kg/cm<sup>2</sup> tidak jauh berbeda dengan bentuk kurva keseluruhan pada tekanan 5 kg/cm<sup>2</sup>. Perbedaannya terlihat kenaikan temperatur awal dingin keluaran dan peningkatan prosentase kapasitas pendinginan pada setiap kurva.

Pertama katup sumbat diatur untuk memperoleh udara dingin keluaran terendah tanpa pemasukan udara suntikan pada fraksi massa udara dingin awal  $\mu_d = 0,24$  atau pada debit udara dingin keluaran awal  $\dot{V}_d = 1,23$  SCFM dan diperoleh temperatur keluaran udara dingin  $T_d = -0,7^\circ\text{C}$  dengan kapasitas pendinginan keluaran  $\dot{Q}_d = 18,63$  watt. Kemudian dimasukkan udara suntikan secara bertahap, terjadi penurunan temperatur dingin terendah pada  $-2,7^\circ\text{C}$  dan kenaikan kapasitas pendinginan 31%. Pemasukan udara suntikan berikutnya akan menaikkan temperatur keluaran udara dingin dan batas akhir pemasukan udara suntikan terjadi pada temperatur dingin keluaran  $T_d = -2,4^\circ\text{C}$  dan masih lebih rendah dari temperatur keluaran udara dingin awal, sedang kenaikan kapasitas pendinginan terus meningkat hingga 49%. Penambahan udara suntikan berikutnya akan mengakibatkan terjadinya arus balik sebagian dari udara suntikan ke udara panas keluaran.

Pengaturan katup sumbat berikutnya dengan mengatur debit udara dingin keluaran awal  $\dot{V}_d = 1,67$  SCFM atau pada fraksi massa udara dingin awal  $\mu_d = 0,35$  dan temperatur awal tanpa udara suntikan sebesar  $3,3^\circ\text{C}$ , dengan kapasitas pendinginan keluaran  $\dot{Q}_d = 22,43$  watt. Pemasukan udara suntikan akan menurunkan temperatur dingin keluaran terendah pada temperatur  $-0,1^\circ\text{C}$  dan kenaikan kapasitas pendinginan 35%. Batas akhir pemasukan udara suntikan terjadi pada temperatur dingin keluaran  $T_d = 0,2^\circ\text{C}$  dengan terus meningkatnya kenaikan kapasitas pendinginan hingga mencapai 48%.

Berikutnya katup sumbat diatur pada debit udara dingin keluaran awal  $\dot{V}_d = 2,11$  SCFM atau pada fraksi massa udara dingin awal  $\mu_d = 0,48$  dengan temperatur keluaran awal tanpa udara suntikan sebesar  $5,5^\circ\text{C}$ , dengan kapasitas pendinginan keluaran  $\dot{Q}_d = 25,49$  watt. Pemasukan udara suntikan akan terus menurunkan temperatur dingin hingga mencapai temperatur terendah  $3,1^\circ\text{C}$  dan kenaikan kapasitas pendinginan maksimal terjadi sebesar 33%. Batas akhir pemasukan udara suntikan mencapai temperatur  $3,9^\circ\text{C}$  pada kenaikan kapasitas pendinginan 34%.

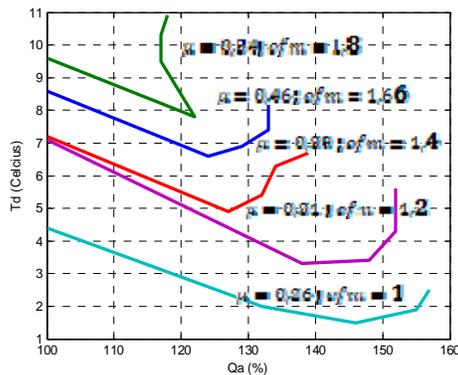
Pada pengaturan katup sumbat dengan debit udara dingin keluaran awal  $\dot{V}_d = 2,62$  SCFM atau pada fraksi massa udara dingin awal  $\mu_d = 0,62$  dengan temperatur keluaran awal tanpa udara suntikan sebesar  $8,2^\circ\text{C}$ , dengan kapasitas pendinginan keluaran  $\dot{Q}_d = 28,63$  watt. Pemasukan udara suntikan akan terus menurunkan temperatur dingin hingga mencapai temperatur terendah  $7,8^\circ\text{C}$  dengan kenaikan prosentase kapasitas pendinginan sebesar 19%. Kenaikan udara suntikan berikutnya akan menaikkan temperatur keluaran udara dingin hingga mencapai batas pemasukan udara suntikan maksimal terjadi

pada temperatur 10,1°C dengan, prosentase kapasitas pendinginan 16% dari kapasitas pendinginan awal. Dibandingkan kurva sebelumnya terjadi perbedaanpun terjadi seperti terlihat pada grafik pada Gambar 5, yakni terjadi pembalikan arah kurva akibat dari penurunan kapasitas pendinginan. Hal ini disebabkan juga oleh kenaikan temperatur dingin udara keluaran yang mendekati temperatur dingin keluaran awal,

Debit udara dingin keluaran awal berikutnya pada  $\dot{V}_d = 2,79$  SCFM atau pada fraksi massa udara dingin awal  $\mu_d = 0,66$  mempunyai temperatur keluaran awal tanpa udara suntikan sebesar 8,4°C, dengan kapasitas pendinginan keluaran  $\dot{Q}_d = 28,77$  watt. Penurunan temperatur keluaran dingin akibat udara suntikanpun terus terjadi hingga mencapai temperatur 7,3 °C dengan kenaikan prosentase kapasitas pendinginan sebesar 8 %. Kenaikan udara suntikan lanjutan akan meningkatkan temperatur udara dingin keluaran di atas temperatur udara keluaran dingin awal tanpa suntikan hingga mencapai temperatur 11,7 keluaran 2% yang merupakan batas akhir pemasukan udara suntikan. Karena kecilnya perosentse keluaran kapasitas pendinginan, maka kurvapun berbalik arah.

**Tekanan udara mampat masukan pada tekanan 3 kg/cm<sup>2</sup>**

Gambar . 7 memperlihatkan grafik hasil pengolahan data pada tabung vortex antara kapasitas pendinginan dengan penurunan temperatur keluaran udara dingin akibat suntikan pada tekanan masukan 3 kg/cm<sup>2</sup>..



Gambar 7. Grafik prosentase Kapasitas pendinginan terhadap penurunan temperatur udara dingin pada tekanan masukan  $P_m = 3$  kg/cm<sup>2</sup>

Pertama katup sumbat diatur untuk memperoleh udara dingin keluaran terendah tanpa pemasukan udara suntikan pada fraksi massa udara dingin awal  $\mu_d = 0,26$  atau pada debit udara dingin keluaran awal  $\dot{V}_d = 1,0$  SCFM dan diperoleh temperatur keluaran udara dingin  $T_d = 4,4$ °C dengan kapasitas pendinginan keluaran  $\dot{Q}_d = 13,38$ watt . Kemudian dimasukkan udara suntikan secara bertahap, terjadi penurunan temperatur dingin terendah pada 1,5°C dan kenaikan

kapasitas pendinginan 46%. . Pemasukan udara suntikan berikutnya akan menaikkan temperatur keluaran udara dingin dan batas akhir pemasukan udara suntikan terjadi pada temperatur dingin keluaran  $T_d = 2,5$ °C dan masih lebih rendah dari temperatur keluaran udaradingin awal, sedang kenaikan kapasitas pendinginan terus meningkat hingga 57%.

Pengaturan katup sumbat berikutnya dengan mengatur debit udara dingin keluaran awal  $\dot{V}_d = 1,2$  SCFM atau pada fraksi massa udara dingin awal  $\mu_d = 0,31$  dan temperatur awal tanpa udara suntikan sebesar 7,1°C, dengan kapasitas pendinginan keluaran  $\dot{Q}_d = 14,18$  watt Pemasukan udara suntikan akan menurunkan temperatur dingin keluaran terendah pada temperatur 3,3 °C dan kenaikan kapasitas pendinginan 38%. Batas akhir pemasukan udara suntikan terjadi pada temperatur dingin keluaran  $T_d = 5,6$ °C dengan terus meningkatnya kenaikan kapasitas pendinginan hingga mencapai 52 %.

Berikutnya katup sumbat diatur pada debit udara dingin keluaran awal  $\dot{V}_d = 1,4$  SCFM atau pada fraksi massa udara dingin awal  $\mu_d = 0,39$  dengan temperatur keluaran awal tanpa udara suntikan sebesar 7,2°C, dengan kapasitas pendinginan keluaran  $\dot{Q}_d = 16,46$  watt . Pemasukan udara suntikan akan terus menurunkan temperatur dingin hingga mencapai temperatur terendah 4,9°C dan kenaikan kapasitas pendinginan maksimal terjadi sebesar 27% . Batas akhir pemasukan udara suntikan mencapai temperatur 6,7°C pada kenaikan kapasitas pendinginan 39%.

Pada pengaturan katup sumbat dengan debit udara dingin keluaran awal  $\dot{V}_d = 1,66$  SCFM atau pada fraksi massa udara dingin awal  $\mu_d = 0,46$  dengan temperatur keluaran awal tanpa udara suntikan sebesar 8,6°C, dengan kapasitas pendinginan keluaran  $\dot{Q}_d = 17,52$  watt. Pemasukan udara suntikan akan terus menurunkan temperatur dingin hingga mencapai temperatur terendah 7,6°C dengan kenaikan prosentase kapasitas pendinginan sebesar 23 % . Kenaikan udara suntikan berikutnya akan menaikkan temperatur udara dingin hingga mencapai batas pemasukan udara suntikan maksimal terjadi pada temperatur 8,3 °C dengan, prosentase kapasitas pendinginan hanya 33% dari kapasitas pendinginan awal.

Debit udara dingin keluaran awal berikutnya pada  $\dot{V}_d = 1,8$  SCFM atau pada fraksi massa udara dingin awal  $\mu_d = 0,54$  mempunyai temperatur keluaran awal tanpa udara suntikan sebesar 9,6 °C, dengan kapasitas pendinginan keluaran  $\dot{Q}_d = 18,67$  watt. Penurunan temperatur keluaran dingin akibat udara suntikanpun terus terjadi hingga mencapai temperatur terendah 7,8 °C dengan kenaikan prosentase kapasitas pendinginan

sebesar 22 % .Kenaikan udara suntikan lanjutan akan meningkatkan temperatur udara dingin keluaran di atas temperatur udara keluaran dingin awal tanpa suntikan hingga mencapai temperatur 10,9°C pada prosentase kenaikan kapasitas pendinginan 18% . Penurunan temperatur udara dingin keluaran yang kecil dari nilai temperatur sebelumnya mengakibatkan kapasitas pendinginan keluaranpun menurun dan terlihat kurvapun berbalik arah.

## KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan dari hasil penelitian yang dilakukan, dapatlah diambil beberapa kesimpulan seperti berikut :

1. Akibat suntikan udara terjadi fenomena penurunan temperatur dan peningkatan debit udara keluaran yang akan meningkatkan kapasitas pendinginan udara
2. Pengaruh tekanan udara mampat masukan terhadap batas penyuntikan udara maksimal tidak terlalu signifikan, terjadi pada fraksi massa udara dingin keluaran  $\mu_{d, maks} = 0,66$  ,untuk tekanan 4 kg/cm<sup>2</sup>  $\mu_{d, maks} = 0,66$  pada tekanan 5 kg/cm<sup>2</sup> dan  $\mu_{d, maks} = 0,66$  dan untuk tekanan 3 kg/cm<sup>2</sup>  $\mu_{d, maks} = 0,54$ .
3. Semakin tinggi tekanan udara mampat masukan kenaikan kapasitas pendinginan  $\dot{Q}_{maks}$ , akibat udara suntikanpun semakin menurun , terjadi pada  $\mu_d = 0,28$  dengan  $\dot{Q}_{maks} = 31$  % pada tekanan 5 kg/cm<sup>2</sup>;  $\mu_d = 0,24$  dengan  $\dot{Q}_{maks} = 49$  % pada tekanan 4 kg/cm<sup>2</sup>  $\mu_d = 0,26$  dengan  $\dot{Q}_{maks} = 57$  % pada tekanan 3 kg/cm<sup>2</sup>

## DAFTAR PUSTAKA

1. Bramo, A.; Pourmahmoud, N, *a Numerical study on the effect of length to diameter ratio and stagnation point on the performance of counter flow Ranque Hilsch vortextube*, Australian Journal of Basic and Applied Science 4(10) : 943-4957, 2010.
2. Gao.C.M, 2005, *Experimental Study on The Ranque-HilchVortex Tube*, PhD Dissertation, Technische Universiteit Eindhoven, [http :\\ alexandria.tue.nl/extra2/200513271.pdf](http://alexandria.tue.nl/extra2/200513271.pdf).
3. Piralishvili S.A.; Polyaev V.M.,1996, *Flow and thermodynamics characteristics Of energy separation in a Double-Circuit Vortex Tube – an Experimental Investigation*, Experimental Thermal and Fluid Science 1996 ; 12:399-4
4. [Http:\\ en. wikipedia.org/wiki/vortex\\_tube](http://en.wikipedia.org/wiki/vortex_tube), *Vortex Tube*.