

SISTEM PENDINGINAN TABUNG VORTEKS

Ali Mahmudi¹⁾ dan Aryadi Suwono¹⁾

RINGKASAN

Untuk kondisi tertentu seperti di tempat penambangan bawah tanah, atau pada pemadam kebakaran, pengkondisian udara individual sering sangat diperlukan untuk dapat menjaga tiap individu pada tingkat yang optimal. Untuk tujuan ini, sistem pengkondisian udara yang konvensional tidak lagi tepat untuk diterapkan. Sistem pendinginan tabung vorteks meskipun ditinjau dari segi COP kurang, tampaknya mempunyai peluang yang cukup besar untuk dapat memenuhi tujuan tersebut.

Dalam tulisan ini, dibahas tentang gejala-gejala yang terlibat dalam pendinginan tabung vorteks. Realisasi perangkat pengujiannya bertujuan untuk memperkenalkan kepada para mahasiswa tentang efek pendinginan vorteks serta berbagai penerapannya melalui suatu praktikum percobaan.

1. PENDAHULUAN

Dalam proses pendinginan untuk menghasilkan temperatur rendah, sistem pendinginan tabung vorteks adalah satu cara untuk mendapatkan efek pendinginan yaitu dengan melakukan ekspansi udara pada tekanan tinggi dan temperatur kamar melalui suatu tabung. Metoda ini sangat sederhana karena hanya memanfaatkan sifat-sifat udara yang ter-ekspansi dan sifat-sifat aliran vorteks.

Tabung vorteks pertama kali diperkenalkan oleh seorang peneliti dari Perancis tahun 1931 bernama Georges Joseph Ranque⁽¹⁾ yang pada hakekatnya berupa tabung silinder yang diberi nosel pada tangensialnya, kemudian udara diekspansikan ke dalam tabung tersebut melalui nosel pada temperatur kamar dan tekanan tinggi. Dalam penelitiannya Ranque mendapatkan pemisahan temperatur yaitu keluaran udara dingin dan keluaran udara panas. Hilsch⁽²⁾ seorang peneliti dari Jerman meneliti dan mengembangkan lebih lanjut eksperimen tentang tabung vorteks. Tahun 1947 Hilsch mempublikasikan secara luas hasil penelitiannya tersebut dan sejak itulah tabung vorteks mulai dikenal sebagai salah satu cara proses pendinginan modern^(3,4).

Pendinginan dengan tabung vorteks dalam prospeknya mempunyai banyak penerapan. Pemakaian yang umum adalah untuk pelengkap pakaian para pekerja di tempat-tempat seperti penambangan bawah tanah, pemadam kebakaran atau pabrik-pabrik peleburan dan pengecoran logam, di mana pengkondisian udara individual sering sangat diperlukan untuk dapat menjaga tiap individu pada tingkat yang optimal, dan dengan pertimbangan bahwa untuk tujuan pendinginan pada tempat seperti di atas, sistem pengkondisian udara yang konvensional tidak lagi tepat untuk diterapkan. Selain untuk pemakaian di atas, banyak industri menggu-

nakan tabung vorteks untuk proses pendinginan di mana penggunaan fluida cairan pendingin tidak diinginkan serta sangat berguna dalam instalasi di mana aliran udara dingin dapat digunakan baik untuk pendinginan juga untuk membuang serpihan-serpihan.

Peralatan tabung vorteks terdiri dari pipa silinder, nosel yang dipasang pada arah tangensial, orifice dan katup pengatur. Sebagai fluida kerja adalah udara yang diekspansikan melalui nosel dalam arah tangensial ke dalam tabung, sehingga secara bersamaan didapatkan keluaran udara dingin melalui orifice dan keluaran udara panas melalui katup pengatur. Penggunaan tabung vorteks dirancang untuk bekerja pada basis yang kontinyu, tanpa menggunakan pengaturan termostatik. Namun dengan adanya katup pengatur dapat digunakan untuk mengatur secara manual yang memungkinkan pemakai tabung vorteks mengatur suhu udara yang keluar sesuai dengan yang diinginkan.

Adalah suatu kenyataan bahwa teori yang melatarbelakangi sistem pendinginan tabung vorteks tidak dapat dimengerti dengan penuh atau dijelaskan dengan tepat oleh buku teks yang ada^(3,7). Lewellen⁽⁴⁾ juga mengungkapkan bahwa belum ada satu pun para ahli/peneliti yang mengkaji dan memberikan data kuantitatif untuk mendapatkan efek pendinginan yang optimal dari tabung vorteks. Namun para ahli sepakat bahwa proses pemisahan temperatur yang terjadi adalah sebagai akibat kombinasi peristiwa-peristiwa: gaya sentrifugal, difusi dan disipasi. Sehingga dalam hal ini, Wheatly dan Lewellen⁽⁴⁾ berdasarkan hasil eksperimennya menganjurkan bahwa dalam perencanaan sistem pendinginan tabung vorteks agar diperoleh efek pendinginan yang optimum adalah dengan menggunakan perbandingan-perbandingan: antara panjang tabung dengan diameter tabung lebih besar atau sama dengan 10; antara diameter tabung dengan dia-

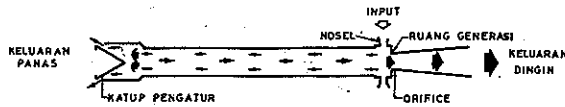
Laboratorium Kriogenika, Refrigerasi dan Pengkondisian Udara, Jurusan Mesin, Institut Teknologi Bandung.

meter orifice adalah 2,5 dan antara diameter tabung dengan diameter nosel adalah 5.

2. TEORI DASAR

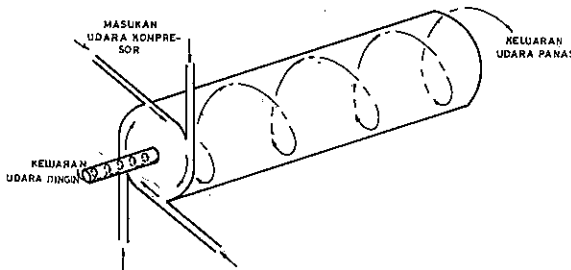
2.1. Prinsip Kerja.

Tabung vorteks adalah alat yang dapat menghasilkan efek pendinginan dan efek pemanasan secara bersamaan. Secara skematis dari tabung vorteks dapat dilihat seperti pada Gambar 1. Peralatan ini secara garis besar terdiri dari pipa silinder, nosel yang dipasang pada arah tangensial, orifice dan katup pengatur.



Gambar 1. Prinsip tabung vorteks.

Udara sebagai fluida kerja pada tekanan tinggi dialirkan ke dalam tabung melalui nosel dalam arah tangensial, sehingga diperoleh kecepatan tangensial yang tinggi dengan pola aliran vorteks seperti diperlihatkan pada Gambar 2. Kecepatan tangensial yang tinggi akan memperbesar gaya sentrifugal yang akan memperkuat proses difusi massa fluida dari inti secara radial ke arah luar. Dengan demikian akan terjadi penurunan temperatur dan tekanan di daerah inti dalam tabung.



Gambar 2. Pola aliran dalam tabung vorteks.

Udara dingin di daerah inti dikeluarkan secara terpisah dengan udara panas di lapisan pada jari-jari yang lebih besar. Udara dingin pada daerah jari-jari yang lebih kecil akan mengalir melalui orifice, sedang udara panas yang berada pada daerah jari-jari yang lebih besar akan mengalir keluar melalui katup pengatur. Katup pengatur dapat juga digunakan untuk mengatur aliran dingin dan aliran panas sehingga dapat menentukan penurunan temperatur pendinginan yang optimum.

Udara pada kondisi yang lumrah mempunyai perilaku yang sangat mendekati gas sempurna sehingga proses ekspansi di dalam tabung vorteks

melalui nosel tidak menurunkan temperatur. Oleh karena itu proses penurunan temperatur di dalam tabung pada dasarnya hanya diakibatkan oleh efek aliran vorteks.

2.2. Persamaan Aliran Vorteks.

Dalam aliran vorteks dikenal dua jenis aliran yaitu aliran vorteks paksa dan aliran vorteks bebas. Secara umum aliran vorteks dapat dicirikan oleh hubungan antara kecepatan tangensial v_t dengan jarak dalam arah radial r , yang dapat ditulis:

$$v_t = k \cdot r^{-n} \quad (1)$$

di mana k adalah konstanta dan n adalah parameter bilangan bulat ± 1 .

Untuk harga $n = -1$ menyatakan aliran vorteks paksa, sedangkan untuk harga $n = +1$ menyatakan aliran vorteks bebas. Untuk tabung vorteks di mana berlaku aliran vorteks bebas, persamaan (1) dapat ditulis:

$$v_t = \frac{k}{r} \quad (2)$$

Dengan menganggap kasus aliran vorteks dalam satu dimensi arah radial dengan tanpa adanya komponen kecepatan radial dan aksial, sehingga hanya terdapat komponen kecepatan tangensial v_t yang merupakan fungsi jari-jari r , serta aliran adalah stasioner dan gaya-gaya badan diabaikan, persamaan aliran dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{dp}{dr} = \rho v_t^2 / r \quad (3)$$

di mana p adalah tekanan dan ρ adalah massa jenis fluida.

$$\frac{d}{dr} \left[r^3 \mu \frac{d}{dr} (v_t / r) \right] = 0 \quad (4)$$

di mana μ adalah koefisien viskositas, dan dengan catatan bahwa koefisien viskositas adalah konstan untuk aliran vorteks bebas, dengan $v_t \sim 1/r$.

Persamaan energi,

$$\frac{d}{dr} \left[kr \frac{dT}{dr} + r^2 \mu v_t \frac{d}{dr} (v_t / r) \right] = 0 \quad (5)$$

di mana T adalah temperatur dan k adalah koefisien konduktivitas termal. Persamaan energi aliran ini hanya diakibatkan oleh disipasi viskos, yaitu kerja oleh tegangan geser dan perpindahan panas konduksi.

Persamaan-persamaan di atas dilengkapi dengan persamaan tingkat keadaan gas sempurna,

$$Pv = RT \quad (6)$$

dan jika diintegrasikan diperoleh persamaan distribusi temperatur,

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{(Pr - \frac{1}{2}) M^2}{\frac{1}{(\gamma-1)} + Pr M^2} \quad (7)$$

di mana T_1 , T_2 , Pr , M dan γ masing-masing menyatakan temperatur udara masuk, temperatur udara dingin, bilangan Prandtl, bilangan Mach dan rasio panas jenis udara.

2.3. Performansi.

Efek pendinginan dan koefisien performansi (COP) yang diperoleh dapat ditentukan dengan persamaan:

$$EP = \dot{m}_c c_p (T_1 - T_2) \quad (8)$$

dan

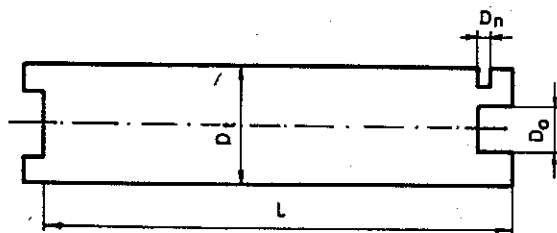
$$COP = q \frac{c_p (T_1 - T_2)}{R T_1 \ln P_1/P_2} \quad (9)$$

di mana:

- $\dot{m}_c$ = laju massa udara dingin.
- c_p = panas jenis udara.
- T_1 = temperatur udara masuk.
- T_2 = temperatur keluar udara dingin.
- q = fraksi udara dingin
= $\frac{\text{laju massa udara dingin}}{\text{laju massa udara total}}$
- R = konstanta gas untuk udara.
- P_1 = tekanan udara masuk.
- P_2 = tekanan udara luar.

3. PERENCANAAN DAN PEMBUATAN PERANGKAT

Penurunan temperatur yang terjadi sangat bergantung pada perbandingan ukuran antara panjang tabung dengan diameter tabung, antara diameter orifice dengan diameter tabung dan antara diameter nosel dengan diameter tabung. Dalam perencanaan tabung vorteks ini, direncanakan berdasarkan data yang optimum dari data eksperimen yang dilakukan oleh Weatly dan Lewellen⁽⁴⁾, yaitu dengan perbandingan ukuran sebagai berikut:



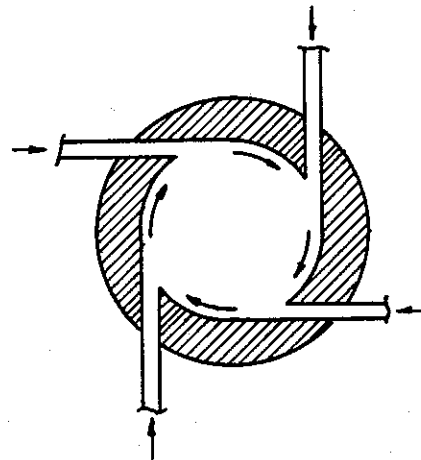
Gambar 3. Perbandingan dimensi tabung vorteks.

$$\frac{\text{Panjang tabung}}{\text{Diameter tabung}} = \frac{L}{D_t} > 10$$

$$\frac{\text{Diameter orifice}}{\text{Diameter tabung}} = \frac{D_o}{D_t} = 0,4$$

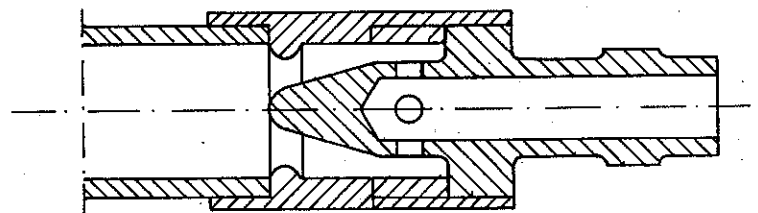
$$\frac{\text{Diameter nosel}}{\text{Diameter tabung}} = \frac{D_n}{D_t} = 0,2$$

Penurunan temperatur juga dipengaruhi oleh besarnya kecepatan tangensial. Untuk memperoleh kecepatan tangensial yang tinggi, udara pada tekanan tinggi dialirkan melalui 4 buah nosel secara tangensial ke dalam tabung seperti diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Aliran udara melalui 4 buah nosel.

Dengan melihat bentuk distribusi temperatur di mana temperatur udara dingin terjadi di daerah jari-jari tabung yang lebih kecil, sedang temperatur udara panas terjadi pada daerah jari-jari yang lebih besar, maka untuk dapat memisahkan keluaran temperatur udara panas agar tidak bercampur dengan udara dingin dibuat katup pengatur jenis ulir seperti diperlihatkan pada Gambar 5.



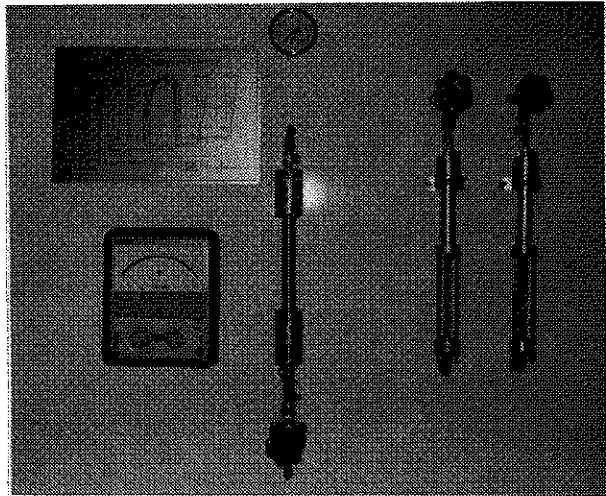
Gambar 5. Katup jenis ulir.

Diameter tabung (diameter dalam) yang direncanakan adalah 12 mm, sedang perbandingan antara panjang tabung dengan diameter tabung (L/D_t) ditentukan sama dengan 12,5, perbandingan

diameter orifice dengan diameter tabung ($\frac{D_o}{D_t} = 0.4$) serta perbandingan antara diameter nosel dengan diameter tabung ($\frac{D_n}{D_t} = 0.2$).

4. PENGUJIAN PERALATAN

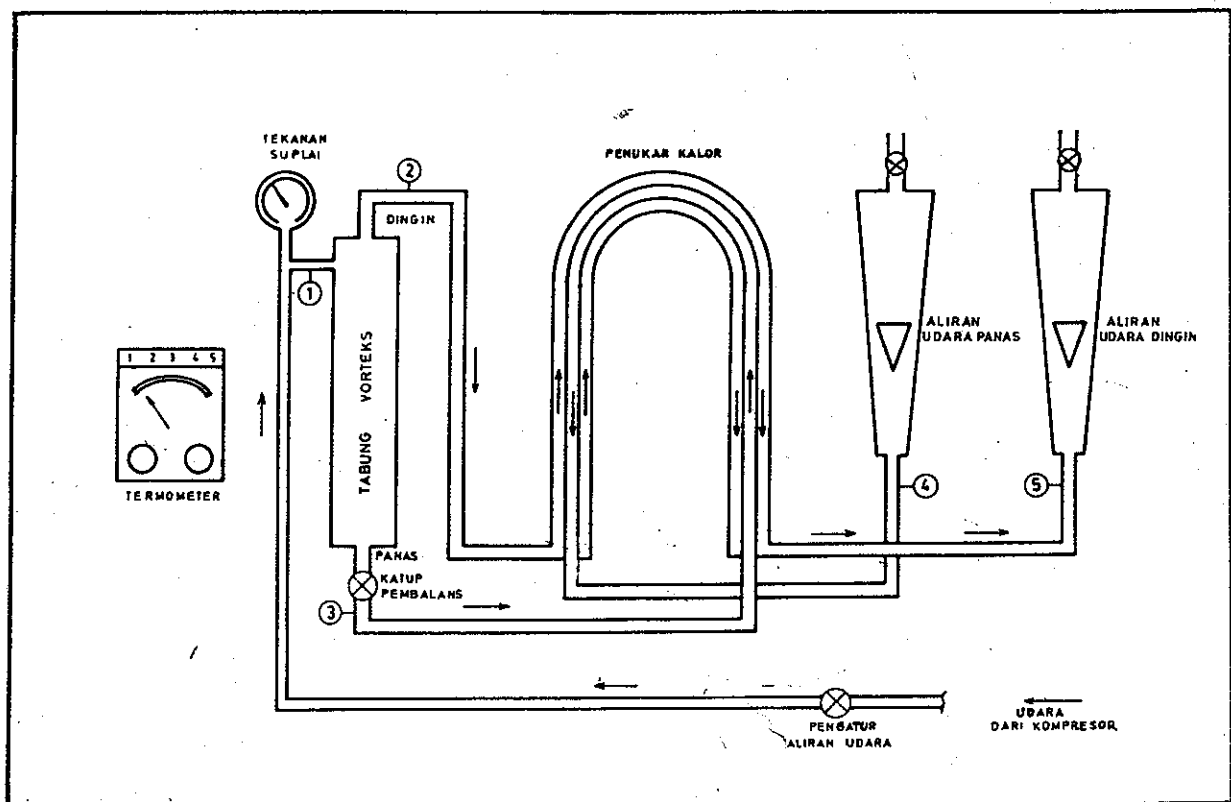
Metoda pengujian peralatan tabung vorteks yang direalisasi menggunakan metoda yang di-



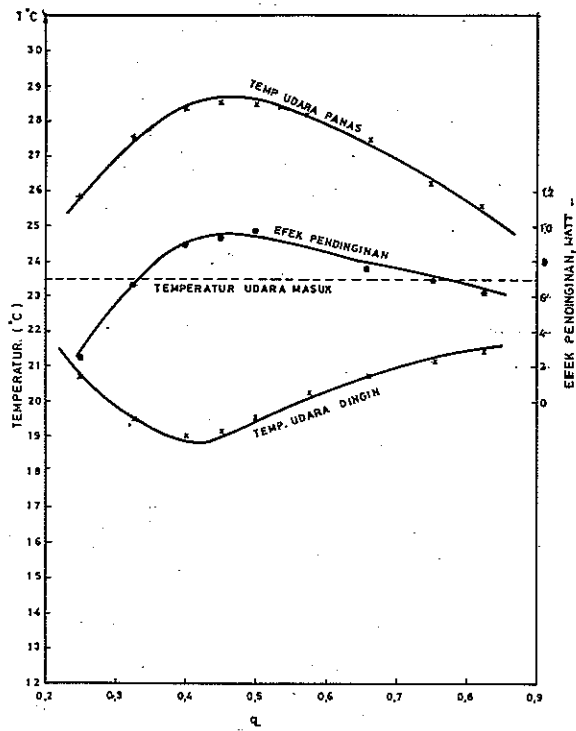
Gambar 6. Perangkat pengujian.

lakukan oleh P.A. Hilton⁽⁷⁾ di mana diperlukan beberapa perangkat alat ukur seperti termometer, rotameter dan pengukur tekanan. Di samping itu juga diperlukan peralatan penukar kalor untuk menyamakan kembali temperatur dari keluaran udara dingin dan udara panas. Besaran-besaran yang diukur adalah tekanan masukan udara ke dalam tabung dari kompresor dengan pengukur, tekanan temperatur dari kelima bagian yang diukur dengan menggunakan termometer elektronik dan laju aliran udara dingin dan udara panas dengan menggunakan rotameter. Instalasi perangkat pengujian tabung vorteks yang direalisasi diperlihatkan pada Gambar 6 dan diagram pengujiannya diperlihatkan seperti pada Gambar 7.

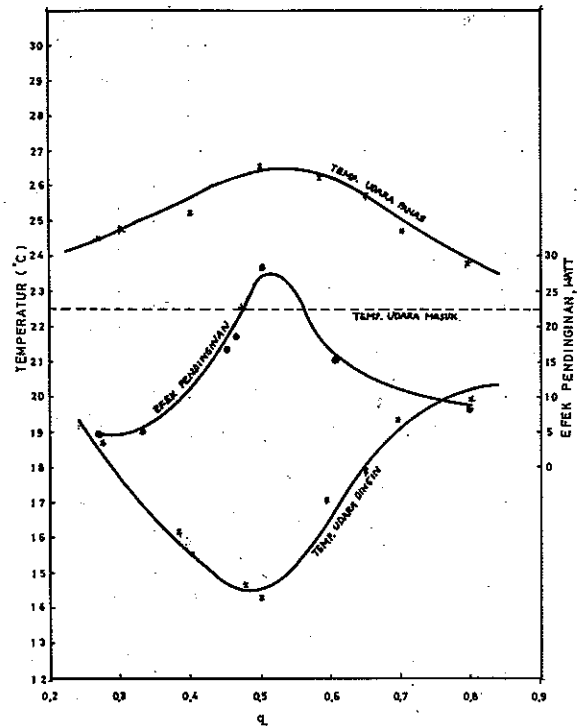
Beberapa hasil pengujian yang diperoleh disajikan dalam bentuk grafik-grafik antara kenaikan temperatur, penurunan temperatur dan efek pendinginan terhadap fraksi udara dingin q seperti diperlihatkan pada Gambar 8, 9, 10 dan 11, masing-masing dilakukan dari percobaan dengan tekanan masukan udara dari kompresor 4 atm, 5 atm, 6 atm dan 7 atm.



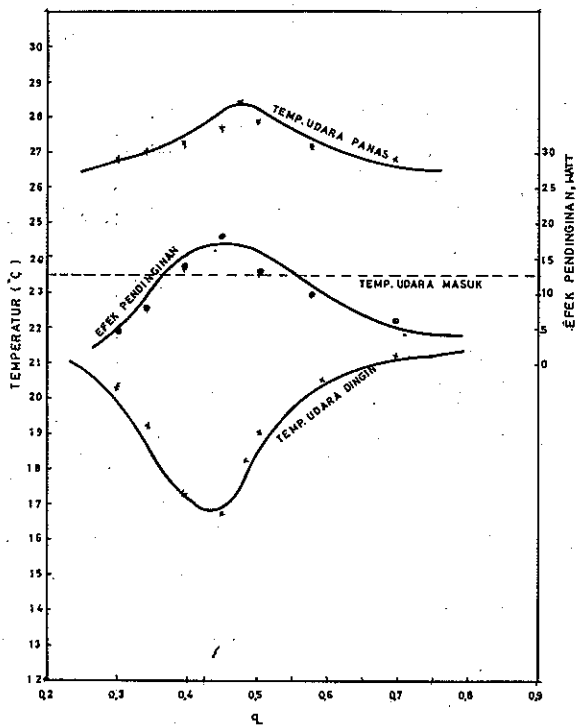
Gambar 7. Diagram pengujian tabung vorteks.



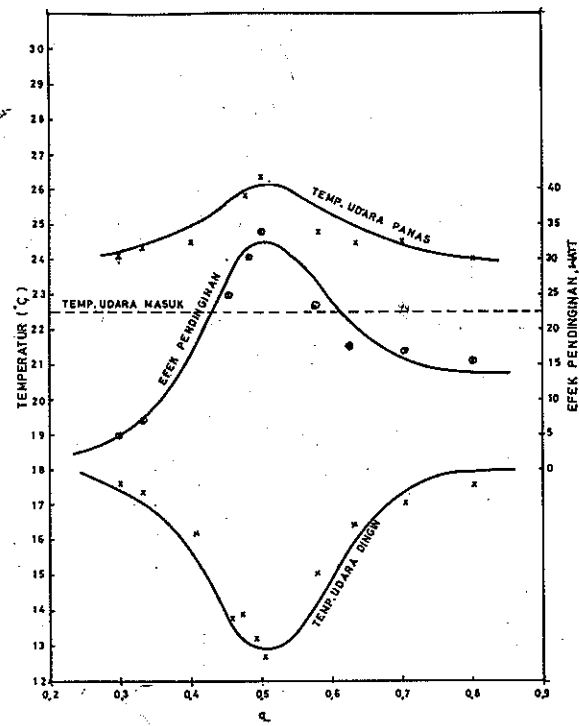
Gambar 8. Hubungan antara kenaikan temperatur, penurunan temperatur dan efek pendinginan terhadap fraksi udara dingin pada $P_i = 4$ atm.



Gambar 10. Hubungan antara kenaikan temperatur, penurunan temperatur dan efek pendinginan terhadap fraksi udara dingin pada $P_i = 6$ atm.



Gambar 9. Hubungan antara kenaikan temperatur, penurunan temperatur dan efek pendinginan terhadap fraksi udara dingin pada $P_i = 5$ atm.



Gambar 11. Hubungan antara kenaikan temperatur, penurunan temperatur dan efek pendinginan terhadap fraksi udara dingin pada $P_i = 7$ atm.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil dari percobaan sistem pendinginan tabung vorteks yang direalisasi, efek pendinginan maksimum yang dapat dicapai adalah sekitar 35 Watt pada laju aliran udara dingin $3,172 \times 10^{-3}$ Kg/s dan koefisien performansi (COP) yang diperoleh sekitar 0,03 pada harga fraksi udara dingin q sama dengan 0,5 pada tekanan udara dari kompresor 7 atm. Hasil yang diperoleh ini lebih kecil jika dibandingkan dengan percobaan yang dilakukan Hilsch⁽²⁾ maupun percobaan yang dilakukan Hilton⁽⁷⁾. Sebagai perbandingan pada tekanan udara masukan yang sama, efek pendinginan hasil percobaan Hilsch adalah sekitar 90 Watt pada harga q sekitar 0,5, sedangkan menurut percobaan Hilton diperoleh efek pendinginan sekitar 120 Watt pada harga q sekitar 0,6. Diperolehnya hasil yang kurang baik dari percobaan yang telah dilakukan antara lain disebabkan oleh aliran udara melalui nosel yang tidak tepat secara tangensial dan kondisi perencanaan tabung vorteks yang belum mencapai optimum.

Untuk tujuan praktikum percobaan tabung vorteks ini perlu disediakan kompresor dan tangki untuk menyediakan udara yang akan diekspansikan ke dalam tabung vorteks, dengan tekanan yang dijaga konstan selama selang waktu percobaan. Sedang mengingat prospek yang baik penggunaan tabung vorteks untuk keadaan-keadaan khusus

seperti telah disebutkan di depan, kiranya masih perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk dapat memperoleh konstruksi maupun performansi yang optimum.

DAFTAR PUSTAKA

1. Ranque, G.J., *Experiment on Expansion in a Vortex with Simultaneous Exhaust of Hot Air and Cold Air*, Le Journal de physique et le radium, Vol. 4, June 1933.
2. Hilsch, R., *The Use of the Expansion of Gases in a Centrifugal Field as Cooling Process*, The Review of Scientific Instrument, Vol. 18 no. 2, Feb. 1947.
3. Althouse, Andrew D., *Modern Refrigeration and Air Conditioning*, South Holland, Illinois: The Goodheart-Wilcox, 1975.
4. Lewellen, W.S., *A Review of Confined Vortex Flows*, NASA, Washington, 1971.
5. Krishner, Joseph M., *Fluid Amplifiers*, Mc. Graw Hill Book Company, New York, 1961.
6. Fulton, C.D., *Ranque Tube*, Journal of ASHRAE, Refrigerating Engineering, Vol. 58 no. 5, May 1950.
7. P.A. Hilton Ltd. Engineers, *Vortex Tube Test Apparatur*, Horsebridge Mill, King's Somborne, England.
8. Ali Mahmudi, *Pengembangan Sistem Pendinginan Tabung Vorteks*, Tugas Sarjana, Jurusan Mesin ITB, 1984.



PT. BANK SUKAPURA

— ESTB 1954 —

KANTOR PUSAT JAKARTA : JL. H. SAMANHUDI No. 6 TELP. 341234-362317-348912 TELEX 44106 SUKA JK 1A
KANTOR CABANG BANDUNG : JL. BRAGA No. 54 TELP. 58216 - 57671 TELEX 28187 SUKA BD
UJUNG PANDANG : JL. NUSANTARA No. 124-126 TELP. 7288 - 7289 - 3622 TELEX 71232 SUKA UP

**MELAYANI SEGALA URUSAN PERBANKAN DAN
MENGUTAMAKAN PERKEMBANGAN USAHA ANDA**