

# Simulasi Numerik Aliran Melewati *Nozzle* Pada *Ejector Converging–Diverging* dengan Variasi Diameter *Exit Nozzle*

**Novi Indah Riani, Syamsuri, Rungky Rianata Pratama**

*Teknik Mesin, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Indonesia*

Article history: Recieved 20/05/2017 Revised 21/06/2017 Accepted : 28/06/2017

## ABSTRAK

Dalam proses pendinginan maupun refrijerasi dibutuhkan komponen yang mampu mengalirkan fluida untuk membuat suatu siklus proses pendinginan. Diantara beberapa sistem kompresi uap, penggunaan ejektor merupakan sistem yang paling sederhana. Ejektor memiliki tiga bagian utama yaitu: *primary nozzle*, *mixing chamber* dan difuser. Berbagai eksperimen dari *steam ejector* dikembangkan untuk meningkatkan nilai COP. *Entrainment ratio* berpengaruh langsung terhadap nilai COP yang dihasilkan oleh sistem, dimana bentuk geometri dan kondisi operasi pada *steam ejector* akan mempengaruhi nilai *entrainment ratio*. Penelitian ini dilakukan secara simulasi numerik menggunakan *software* komersial CFD dengan *k-epsilon* untuk memprediksi fenomena aliran yang melewati *nozzle* pada *ejector converging-diverging* dengan memvariasikan diameter *exit nozzle* meliputi 3,5 mm; 4mm; 5 mm; dan 5,5 mm. Hasil simulasi menunjukkan *steam ejector* dengan diameter *exit nozzle* terkecil 3,5 mm memberikan performansi yang optimum karena memiliki kecepatan tertinggi, maka tingkat vakum pada *mixing chamber* meningkat menyebabkan massa *secondary flow* bertambah dan nilai *entrainment ratio* semakin tinggi.

**Kata kunci:** *ejektor, mixing chamber, diameter exit nozzle, k-epsilon, converging–diverging*

## ABSTRACT

*In the process of cooling or refrigeration, are required components where capable to flow the fluid to create a cycle of the cooling process. Among some of the vapor compression systems, the usage of ejector is the simplest system. Ejector has three main parts: primary nozzle, mixing chamber and diffuser. Various experiments of steam ejectors developed to increase the value of the COP. Entrainment ratio directly affects to the COP value generated by the system, where the geometric shapes and operating conditions in the steam ejector will affect to the value entrainment ratio. This research was carried out numerical simulations using CFD commercial software with k-epsilon to predict flow phenomena which passes through the ejector nozzle in the ejector converging-diverging which varying exit diameters 3.5 mm; 4mm; 5 mm; and 5.5 mm. Respectively the simulation results showed exit nozzle steam ejector that the smallest diameter of 3.5 mm give the optimum performance because it provide the highest speed of fluidity. While the state of vacuum in mixing chamber increase, it cause the secondary mass flow higher as well as the value of the entrainment ratio.*

**Keyword :** *ejector, mixing chamber, diameter exit nozzle, k-epsilon, converging–diverging*

\*Corresponding author.

E-mail address: [noviindahriani@itats.ac.id](mailto:noviindahriani@itats.ac.id)

Peer reviewed under responsibility of Universitas Muhammadiyah Sidoarjo.

© 2017 Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, All right reserved, This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



**Novi Indah Riani** lulus sarjana dari Universitas Negeri Surabaya dan magister di Teknik Mesin ITS Surabaya. Kemudian bekerja di ITATS mulai tahun 2015 dengan bidang konversi energi.



**Syamsuri, ST., MT., Ph.D**, lulusan S1 Teknik Mesin ITATS, kemudian magister di ITS dan doktor di NTUST Taiwan dengan bidang keahlian konversi energi khususnya mekanika fluida, perpindahan kalor & massa, serta CFD.

## PENDAHULUAN

Refrigerasi dan penyejuk udara (*Air Conditioning*) merupakan salah satu teknologi yang digunakan untuk mendinginkan suatu produk atau penyejuk ruangan. Dalam proses pendinginan membutuhkan komponen yang mampu mengalirkan fluida untuk membuat suatu siklus pendinginan. Umumnya, komponen yang banyak digunakan adalah kompresor. Namun, komponen ini membutuhkan daya yang besar dari luar untuk menggerakkan sudu-sudunya. Daya yang digunakan untuk memutar kompresor ini adalah energi listrik dimana sebagian pembangkit listrik di Indonesia menggunakan bahan bakar fosil untuk memanasi boiler. Penggunaan bahan bakar fosil di Indonesia dirasa masih menjadi pilihan utama oleh pemerintah, namun penggunaan energi fosil juga memberikan kerugian terhadap lingkungan karena dalam pembakaran bahan bakar fosil menghasilkan produk sampingan yang berupa  $SO_x$ ,  $NO_x$ ,  $CO_2$  dan gas lain yang berpotensi memperburuk pemanasan global. Hal ini mendorong para pengembang sistem pendinginan untuk menciptakan suatu proses yang lebih ramah lingkungan dengan pemanfaatan energi sisa dan sebagainya. Salah satu pengembangan yang dilakukan mengacu pada *entrainment and compression* uap bertekanan rendah ke tekanan yang lebih tinggi. Dalam hal ini, ejector dapat digunakan untuk menjalankan proses kompresi tersebut.

Penggunaan ejector memberikan beberapa keuntungan, antara lain konstruksi ejector tidak melibatkan *valve*, *rotor*, dan *moving parts*. Ejector juga tersedia secara komersial dalam berbagai ukuran dan aplikasi yang berbeda. Selain itu, penggunaan ejector memerlukan investasi yang kecil dan biaya perawatan yang rendah dibanding sistem atau konfigurasi yang lain.

Ejector sendiri merupakan alat yang digunakan untuk menggerakkan atau mengalirkan fluida dengan jalan memanfaatkan aliran fluida lain. Fluida yang digunakan untuk mendorong aliran fluida lain disebut *motive fluid*, sedangkan fluida yang terdorong disebut *suction fluid*. Fluida yang digunakan dalam mengoperasikan ejector dapat berupa cairan, gas, atau uap. Pada umumnya, *motive fluid* untuk ejector adalah *steam* atau udara. Ejector dikenal juga sebagai *vacuum jet*, *jet pump*, atau *thermo-compressor* yang merupakan *pumping device* dimana menggunakan efek venturi untuk mengubah energi tekanan dari fluida primer

menjadi energi kinetik [1]. Menurut Sriveerakul, dkk (2006), prinsip kerja ejector yaitu panas ditambahkan pada boiler sehingga menyebabkan air sebagai fluida kerja berubah menjadi uap bertekanan dan bertemperatur tinggi (*primary fluid*). Uap tersebut berekspansi melewati nosel dan menghasilkan tekanan yang sangat rendah pada kecepatan tinggi (*supersonic velocity*). Perbedaan tekanan antara ujung nosel dan evaporator menyebabkan air pada evaporator terhisap pada temperatur rendah dan menghasilkan *refrigeration effect*. Air (*secondary fluid*) yang terhisap kemudian bercampur dengan *primary fluid* pada *mixing chamber ejector* pada tekanan konstan. Campuran fluida berekspansi melewati difuser dan mengalami kenaikan tekanan serta penurunan kecepatan (*subsonic velocity*) [2]. Komponen utama ejector adalah nosel. Nosel merupakan bagian terkecil pada ejector yang berfungsi untuk mengonversi energi tekanan pada *primary fluid* menjadi energi kinetik. Pada bagian ini, fluida akan mengalami *shock wave* sebagai akibat dari perubahan tekanan dan kecepatan secara mendadak [1]. Adapun bagian-bagian nosel meliputi, *convergent*, *throat*, dan *divergent*.

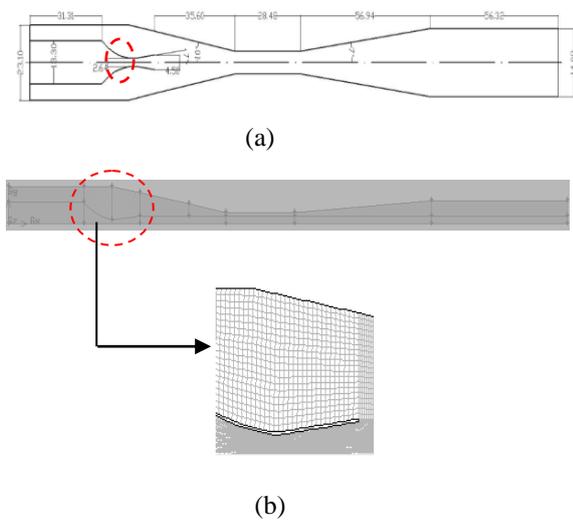
Salah satu parameter yang berpengaruh pada ejector adalah desain geometrinya. Menurut Apornranata dan Eames, jarak nosel terhadap *mixing chamber* memiliki pengaruh terhadap COP (*Coefficient of Performance*) dari siklus refrigerasi ejector [3]. Hasil penelitian menunjukkan semakin dekat jarak nosel dengan *mixing chamber*, maka akan terjadi penurunan *entrainment ratio*. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Surjosatyo, dkk dengan menggunakan *software CFD k-epsilon* menunjukkan bahwa performa ejector akan meningkat ketika posisi 5-15 nosel semakin menjauhi ruang pencampuran [4]. Sedangkan Pianthong, dkk melakukan simulasi menggunakan CFD untuk melihat fenomena aliran dan performa pada *Constant Pressure Area* (CPA) ejector dan *Constant Mixing Area* (CMA). Fluida yang digunakan adalah air dengan temperatur boiler 120-140 °C dan temperatur evaporator 5-15 °C. Hasil yang ditunjukkan oleh CFD dapat memprediksi kinerja *ejector* dengan sangat baik dan mengungkapkan pengaruh kondisi operasi pada daerah yang efektif yang langsung berhubungan dengan kinerjanya. Selain itu, ditemukan bahwa kecepatan aliran didaerah hisap sangat rendah dan tidak signifikan terhadap perilaku aliran secara keseluruhan [5].

Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan performa ejector. Salah satunya dengan memvariasikan diameter keluaran nosel dengan tipe *converging-diverging* terhadap *entrainment ratio* dan pola aliran yang melewati nosel tersebut.

## METODE

Penelitian ini dilakukan dengan metode numerik 2 dimensi yang menggunakan *software CFD* komersial. Skema geometri pada penelitian ini dapat dilihat pada

gambar 1. Model ejektor yang digunakan dalam simulasi ini adalah model ejektor (*base model*) berdasarkan literatur [6].



Gambar 1. (a) Geometri *set-up steam ejector refrigeration*; (b) Pemodelan *ejector* pada Gambit

Adapun variasi yang dilakukan pada penelitian ini terletak pada daerah yang diberi lingkaran merah (garis putus-putus) yakni diameter *exit nozzle* meliputi 3,5 mm; 4 mm; 5 mm; dan 5,5 mm.

Tahapan yang dilakukan pada penelitian ini dibagi menjadi tiga tahapan, yaitu:

a. *Pre-processing*

Tahap *pre-processing* merupakan tahap awal untuk menganalisa pemodelan CFD. Tahap ini terdiri dari pembuatan geometri, meshing, dan penentuan kondisi batas menggunakan GAMBIT.

b. *Processing*

Pada tahap ini menggunakan *software* CFD komersial Fluent yang dimulai dengan memasukkan data hasil *meshing*. *Turbulence model* pada penelitian ini menggunakan *k-epsilon* RNG dan persamaan energi diaktifkan dengan fluida yang dipakai adalah *refrigerant* R141b (CH<sub>3</sub>CCl<sub>2</sub>F). Untuk *properties density* ( $\rho$ ) = *ideal gas*; Kalor spesifik = 863,76 (J/kgK); Konduktivitas termal ( $k$ ) = 0,01201333 (W/m K); Viskositas = 0,000100579 (poise) dan Massa molekul ( $M_m$ ) = 117 (kg/kgmol).

Batasan yang terjadi pada aliran yang melewati benda uji berupa *inlet: pressure inlet* dan *outlet: pressure outlet*. Untuk *Gauge Total Pressure*: 477230 Pascal, *Turbulent Kinetic Energy* dan *Turbulent Dissipation Rate* masing-masing sebesar 1 dengan temperatur total 85°C. Sedangkan Untuk *pressure suction* sebesar 110160 Pa dan temperturnya 32°C. Kemudian untuk *pressure discharge* pada panel yang berbeda yakni memakai kondisi batas *pressure outlet* dan *Gauge pressure* sebesar 132900 Pa pada temperatur 40 °C. Solusi yang digunakan dalam simulasi ini adalah *second order* dengan kriteria konvergen sebesar  $10^{-6}$  pada

kondisi *steady*. Karena *steady*, maka jumlah iterasi yang dibutuhkan menunggu hingga proses *running* konvergen.

c. *Post-processing*

*Post processing* adalah proses menampilkan hasil serta analisa terhadap hasil yang diperoleh. Adapun data yang akan diambil antara lain nilai *Mach number*, kontur temperatur statis, kontur tekanan statis dan vektor kecepatan.

**HASIL**

Fokus dari penelitian ini adalah mengetahui diameter *exit nozzle* yang dapat memberikan performansi paling optimal. Data-data yang ditampilkan berupa nilai *Mach number*, temperatur statis, tekanan statis dan vektor kecepatan *mixing chamber*.

**Validasi Numerik**

Sebelum melakukan *post processing*, perlu dilakukan validasi numerik terhadap *meshing* yang digunakan. Data hasil simulasi numerik dibandingkan dengan data eksperimen yang dilakukan oleh Fahrnis (2010).

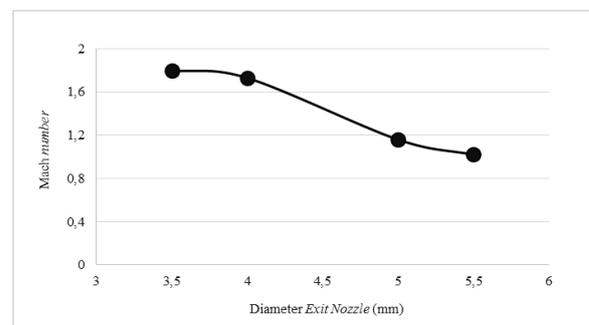
Tabel 1. Nilai *Mach number*

No.	Identitas	Nilai <i>Mach number</i>
1.	Mohammad Faris (2010)	1.39e+00
2.	Penelitian yang dilakukan	1.37e+00

Berdasarkan hasil yang ditunjukkan pada tabel 1, terlihat bahwa nilai *Mach number* pada penelitian saat ini sudah cukup baik dimana nilainya sekitar 1,43% dari penelitian yang sudah dilakukan oleh peneliti sebelumnya [7]. Hal ini menunjukkan *meshing* kali ini sudah cukup baik karena prosentase kurang dari 10% [8].

**Pengaruh Diameter Exit Nozzle terhadap Nilai Mach Number**

Untuk melihat perubahan yang terjadi di sepanjang *throat section steam ejector*, akan dianalisa melalui grafik *Mach number* yang ditunjukkan pada gambar 2 berikut:



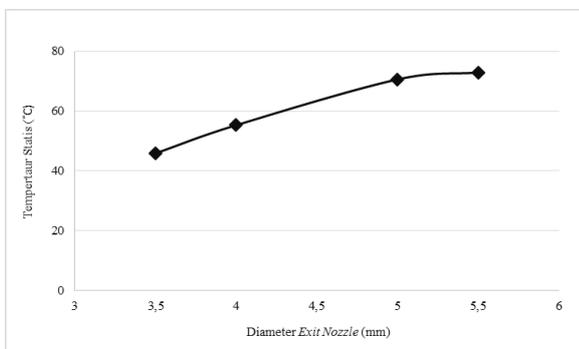
Gambar 2. Variasi  $D_{out}$  *nozzle* terhadap *Mach number*.

Pada gambar tersebut, terlihat penurunan nilai *Mach number* seiring bertambah besarnya diameter *exit nozzle*. Hal ini bisa terjadi dikarenakan fenomena

*single choking* atau bisa disebut *choke flow* dimana kondisi dinamika fluida yang terjadi karena efek venturi. Kondisi ini terjadi ketika aliran fluida diberikan tekanan dan temperatur kemudian melewati kedalam celah yang sempit (seperti *throat* dari *convergent-divergent nozzle* atau katup di sebuah pipa) sehingga tekanan dari fluida berkurang dan kecepatannya bertambah. Nilai bilangan Mach pada penelitian kali ini 1,02 hingga 1,8, sehingga dapat dikatakan aliran tersebut *supersonic compressible* [9].

### Pengaruh Diameter Exit Nozzle terhadap Temperatur Statis pada Mixing Chamber

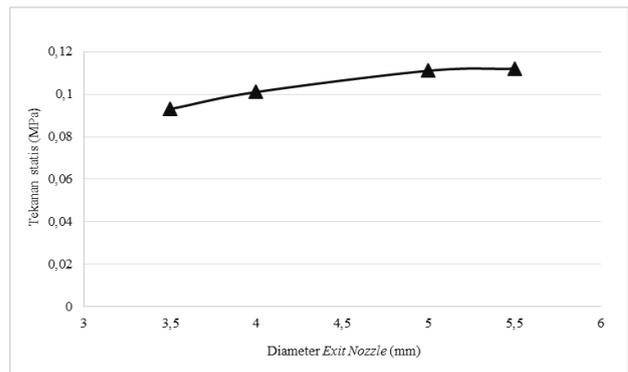
Perbandingan kali ini adalah nilai temperatur statis yang dihasilkan dari simulasi dengan berbagai diameter *exit nozzle* pada *steam ejector refrigeration*. Untuk nilai temperatur statis pada *mixing chamber* terdapat perbedaan. Pada diameter *exit nozzle* 3,5; 4; 5; 5,5 mm masing-masing nilai temperatur statis pada *mixing chamber* sebesar 45,9°C; 55,3°C; 70,6°C; dan 72,9°C. Kenaikan temperatur statis pada *mixing chamber* (Gambar 3) dikarenakan temperatur pada *motive fluid* lebih besar daripada *suction fluid* yakni 85°C dibanding 32°C. Ketika kedua fluida itu bersatu di *mixing chamber* temperaturnya berubah dari *motive fluid* yang terlihat temperaturnya menurun dan disisi sebaliknya *suction fluid* justru naik. Hal ini berarti pencampuran temperatur fluida antara *motive fluid* dan *suction fluid* merata. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin besar diameter *exit nozzle* maka nilai temperatur statis pada *mixing chamber* semakin tinggi juga.



Gambar 3. Variasi  $D_{out}$  nozzle terhadap temperatur statis

### Tekanan Statis pada Mixing Chamber

Nilai *entrainment ratio* ditentukan dari besar *effective area secondary flow* pada *mixing chamber* dan *constant area section*. Semakin besar *effective area secondary* akan meningkatkan nilai *entrainment ratio* pada sebuah ejektor. Nilai *entrainment ratio* juga ditentukan oleh besarnya area *mixing chamber*, semakin kecil area *mixing chamber* maka *effective area secondary flow* dan fluks aliran *primary* yang menarik aliran dari *suction* juga semakin kecil, sehingga nilai *entrainment ratio* yang dihasilkan semakin menurun [10].

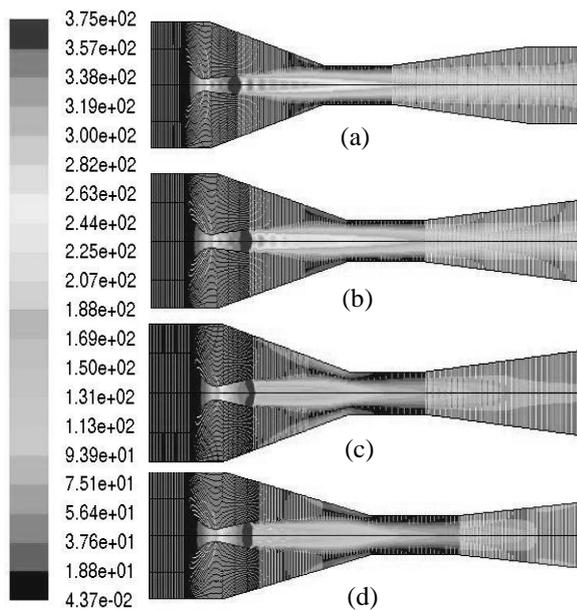


Gambar 4. Variasi  $D_{out}$  nozzle Terhadap Tekanan Statis

Proses pengujian distribusi tekanan statis pada *mixing chamber* dilakukan untuk mengetahui besarnya tekanan aliran yang terjadi, dimana diukur mulai posisi keluaran *primary nozzle* sampai ujung keluaran divergen. Peningkatan tekanan statis yang ditunjukkan pada gambar 4 dikarenakan diameter area pada bagian *exit nozzle* diperbesar sehingga nilai tekanan yang dihasilkan pada *mixing chamber* akan semakin melebihi nilai tekanan pada daerah *suction fluid*. Hal ini dapat terjadi karena adanya pengaruh perubahan luas penampang venturi, dimana menurut persamaan Bernoulli dikatakan bahwa makin luas sebuah penampang venturi maka makin besar tekanannya. [11].

### Kontur Kecepatan pada Mixing Chamber

Pada gambar 5 dibawah, kontur kecepatan dapat dikatakan hampir seragam. Semakin besar area *mixing chamber* maka fluks massa *secondary flow* semakin besar dan nilai *entrainment ratio* juga akan semakin meningkat. Kecepatan *motive fluid* bertambah terutama saat terjadi *single choking* yaitu sebesar 323 m/s dan berangsur-angsur turun saat berada di *mixing chamber* hingga sebesar 275 m/s (pada gambar 5a). Dan juga di gambar tersebut terlihat kecepatan *suction fluid* yang menurun drastis setelah melewati *mixing chamber* atau di daerah *throat section* sampai sebesar  $2,46 \times 10^{-2}$  m/s sehingga menghasilkan kevakuman yang besar. Hal ini dapat mengakibatkan laju aliran massa *secondary flow* yang terhisap semakin banyak, sehingga nilai *entrainment ratio* yang dihasilkan akan optimal. Hal serupa juga terjadi pada gambar 5b yakni kecepatan *motive fluid* bertambah sebesar 345 m/s dan berangsur-angsur turun saat berada di *mixing chamber* hingga sebesar 259 m/s.



Gambar 5. Vektor Kecepatan pada: (a) diameter *exit nozzle* 3,5 mm; (b) diameter *exit nozzle* 4 mm; (c) diameter *exit nozzle* 5 mm; dan (d) diameter *exit nozzle* 5,5 mm

Pada gambar 5c dan 5d, nilai *entrainment ratio* kembali menurun setelah jarak nosel dengan *constant area section* pada 4 kali diameter *constant area section* (*throat section*) [10], penurunan nilai tersebut dapat dilihat dari vektor kecepatan aliran di daerah difuser semakin kecil. Hal ini disebabkan karena tekanan dan temperatur pada daerah  *motive* dan *suction* tidak terlalu besar untuk membentuk profil kecepatan yang seragam sehingga menambah total kehilangan energi di *ejector diffuser*.

## KESIMPULAN

Berdasarkan analisa yang telah dibahas mengenai pengaruh variasi diameter *exit nozzle* terhadap performa *steam ejector* dan karakteristik aliran yang melewatinya, maka:

1. Semakin besar diameter *exit nozzle* yang divariasikan, maka nilai Mach number yang didapatkan akan semakin menurun, hal ini dikarenakan fenomena *single choking* atau bisa disebut *choke flow* dimana kondisi dinamika fluida yang terjadi karena efek venturi. Pada diameter *exit nozzle* 3,5 mm didapatkan nilai Mach number yang paling besar yakni 1,8. Sedangkan untuk temperatur dan tekanan statis pada *mixing chamber* didapatkan nilai yang paling tinggi pada diameter *exit nozzle* 5,5 mm. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar temperatur dan tekanan yang dihasilkan terutama pada daerah  *motive*, maka akan mengakibatkan *entrainment ratio* juga semakin menurun.
2. Nilai optimum temperatur dan tekanan statis pada daerah *mixing chamber* berada di diameter *exit nozzle* 5,5 mm. Namun untuk nilai optimum temperatur *suction* yang paling tinggi pada diameter

*exit nozzle* yang paling kecil yaitu 3,5 mm. Hal ini dikarenakan Semakin tinggi temperatur *suction* maka nilai *entrainment ratio* semakin meningkat sedangkan semakin tinggi temperatur  *motive* maka nilai *entrainment ratio* semakin menurun.

3. Bila diameter *exit nozzle* diperbesar, maka tekanan dan temperatur pada  *motive* dan *suction* tidak terlalu besar untuk membentuk profil kecepatan yang seragam sehingga menambah total kehilangan energi di *ejector diffuser* dan nilai *entrainment ratio* akan semakin menurun.

## REFERENSI

- [1] Zhu, Yin Hai, Jiang, Peixue. *Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Shock Wave Characteristic on the Ejector Performance*. International Journal of Refrigerant. 40, 31- 42, 2013.
- [2] Sriveerakul, T., Aphornranata, S., Chunnanond, K. *Performance Prediction of Steam Ejector Using Computational Fluid Dynamics: Part 1. Validation of the CFD Results*. International Journal of Thermal Sciences. 46, 812 – 822, 2006.
- [3] Apornranata, S., Eames, I., W. *A Small Capacity Steam-ejector Refrigerator: Experimental Investigation of a System Using Ejector with Movable Primary Nozzle*. International Journal Refrigeration. 20 (5), 352-358, 1997.
- [4] Surjosatyo, A., Vidian, F., Sulisty Nugroho, F. *Kajian Komputasi Pengaruh Posisi Keluaran Nozel Terhadap Kinerja Ejector Udara Pada Sistem Aliran Bersirkulasi Eksternal*. Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM). ISBN: 978-602-97742-0-7, 2010.
- [5] Pianthong, K., Seehanam, W., Behnia, M., Sriveerakul, T. *Investigation and Improvement of Ejector Refrigeration System Using Computational Fluid Dynamics Technique*. International Journal of Energy Conversion Management. Vol 48 Issue 9. pp 2556 – 2564, 2007.
- [6] Huang BJ, Chang JM, Wang CP, Petrenko VA. *A 1D Analysis of Ejector Performance*. Int J Refrigeration. Vol. 22, 354–364, 1999.
- [7] Fahriss, Mohammad. *Analisa Variasi Panjang Throat Section Terhadap Entrainment Ratio Pada Steam Ejector Refrigerasi Dengan Menggunakan CFD*. Jurnal Teknik UNISFAT Vol.5 No.2 Maret 2010 Hal 15-23, 2010.
- [8] FLUENT, Inc. *Manual Fluent Documentation*. FLUENT, Inc, 1998.
- [9] White, Frank M. *Fluid Mechanics*. WBC McGraw-Hill. Boston, 1988.
- [10] Utomo, Tony, S., Nugroho, Sri, Yohana, E. *Analisa Pengaruh Posisi Keluaran Nosel Primer Terhadap Performa Steam Ejector Menggunakan CFD*. Jurnal Teknik Mesin ROTASI Undip Vol. 13 No. 2 April 2011. 22 – 23, 2011.

- [11] Munson, Bruce R., Young, Donald F., Okiishi, Theodore H. *Mekanika Fluida Jilid I*. Edisi Keempat. Jakarta: Erlangga, 2004.