

## KAJI EKSPERIMENTAL PENGARUH BENTUK GEOMETRI SUDUT *CONVERGING DUCT* DAN PANJANG *CONSTANT-AREA SECTION* PADA PERFORMA SISTEM REFRIGERASI *STEAM EJECTOR*

Muhammad Subri <sup>1\*</sup>, Tony Suryo Utomo <sup>2</sup>, Berkah Fajar TK <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratorium Thermofluid Magister Teknik Mesin, FT-UNDIP Semarang

<sup>2</sup> Program Studi Magister Teknik Mesin, FT-UNDIP Semarang

Jl. Prof. H. Soedarto, SH Tembalang-Semarang 50275

Telp. (024) 7460059-70420846

\*Email: subrimakkasau@gmail.com

### Abstrak

*Refrigerasi steam ejector merupakan sistem refrigerasi dengan memanfaatkan limbah panas sebagai sumber energi utamanya. Steam ejector berperan sebagai pengganti kompresor pada siklus kompresi uap. Refrigerasi steam ejector memiliki koefisien kinerja (Coefisien of performance, COP) yang rendah, sehingga perlu dilakukan penelitian karakteristik dengan membuat desain geometri steam ejector untuk memperbaiki dan mengoptimalkan kinerja dari steam ejector-nya. Kinerja steam ejector dapat dilihat dari besarnya nilai entrainment ratio yaitu perbandingan laju aliran massa suction dari evaporator dengan laju aliran massa motive dari boiler. Meningkatnya nilai entrainment ratio steam ejector dapat meningkatkan COP sistem refrigerasi tersebut.*

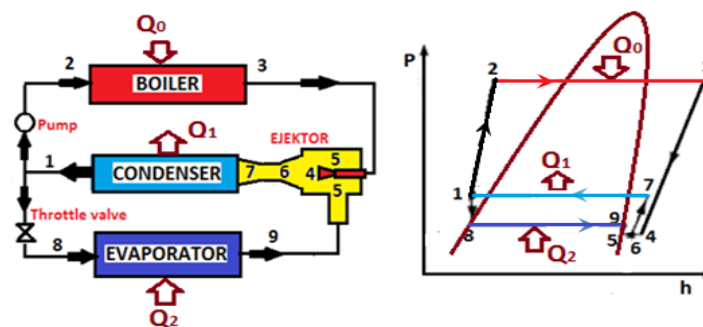
*Pada penelitian ini dilakukan eksperimen dengan memodifikasi bentuk geometri sudut converging duct dari 3°, 5°, 7,5°, 10°, 15°, dan 18° dan panjang constant area section (throat section) dari 2D(36 mm), 3D(54 mm), 4D(72 mm), dan 5D(90 mm), panjang constant area section merupakan kelipatan dari diameter throat dengan memperluas diameter throat ejector dari 18 mm. Jenis steam ejector yang digunakan adalah Constant-pressure mixing dan uap air (R-718b) digunakan sebagai fluida kerja. Kondisi awal operasi tekanan boiler (tekanan motive) konstan pada tekanan 5 kg/cm<sup>2</sup>. Temperatur air evaporator 97°C.*

*Hasil eksperimen menunjukkan bahwa perubahan bentuk geometri sudut converging duct dan panjang constan-area section mempengaruhi nilai entrainment ratio steam ejector dan COP sistem. Nilai optimal entrainment ratio steam ejector dan COP sistem diperoleh pada sudut converging duct 7,5° dengan panjang constan area section 4D(72 mm) dengan nilai masing-masing 0,5172 dan 0,5619.*

**Kata kunci:** *Constan-area section, Converging duct, COP, entrainment ratio, Steam ejector.*

### 1. PENDAHULUAN

*Steam ejector* adalah alat yang digunakan untuk menggerakkan fluida dengan jalan memanfaatkan aliran fluida lain. Fluida yang digunakan untuk mendorong aliran fluida lain disebut *primary fluid (motive)*, sedangkan fluida yang terdorong disebut *secondary fluid (suction)*. Pada umumnya *primary fluid* untuk ejektor adalah uap (*steam*) atau udara bertekanan tinggi. *Steam ejector* merupakan bagian penting dalam sistem refrigerasi *steam ejector* karena berperan sebagai pengganti kompresor pada siklus kompresi uap. Fungsi kompresor digantikan oleh pompa cairan (*liquid feed pump*), boiler, dan *ejector* seperti ditunjukkan pada gambar 1. Komponen-komponen utama siklus refrigerasi *steam ejector* terdiri dari boiler, *ejector*, *condensor* dan *evaporator*. *Steam ejector* juga dapat diaplikasikan dalam sistem desalinasi, penyulingan minyak bumi, industri kimia, dan alat penvakuman sistem.



**Gambar 1. Siklus Refrigerasi Steam Ejector (Meyer JA, 2006., Elbel, S dkk, 2008 ).**

Pada situasi krisis energi sekarang ini, *refrigerasi steam ejector* nampaknya dapat diaplikasikan menjadi sistem refrigerasi skala besar karena tidak banyak memerlukan sumber energi, dapat memanfaatkan panas terbuang dari berbagai proses industri seperti sistem pembakaran, sistem pembangkit daya, dan proses-proses industri lainnya dan digunakan untuk menghasilkan proses refrigerasi atau pendinginan, disamping itu memiliki konstruksi yang sederhana, biaya perawatan dan operasionalnya lebih rendah dibanding siklus kompresi uap (Meyer, J. A, 2006), dan air dapat digunakan sebagai fluida *refrigerant* sehingga sangat ramah lingkungan (Chunnonond, K and Aphornratana, S, 2004).

Kelemahan sistem ini yaitu memiliki koefisien performa (*COP*) yang rendah. Banyak faktor yang mempengaruhi kinerja refrigerasi *steam ejector* (*COP*) dan kinerja *steam ejector* (*entrainment ratio*), termasuk berat molekul fluida, kondisi awal operasi seperti tekanan dan temperatur  *motive* atau generator uap, tekanan dan temperatur  *evaporator*, tekanan dan temperatur kondensor, dan bentuk geometri dari *steam ejector* seperti sudut *suction chamber* (*converging duct*) sudut *diffuser* (*divergen*), panjang pipa percampuran (*constant-area section*) dan diameter *throat*, posisi nozel, kecepatan motif dan rasio panas spesifik (De-Frate and Hoerl, 1959., Kim dkk, 1990).

Kinerja *steam ejector* dilihat dari besarnya nilai *entrainment ratio* yaitu perbandingan laju aliran massa *suction* (*secondary flow*) dari  *evaporator* dengan laju aliran massa  *motive* (*primary flow*) dari  *boiler*. Peningkatan nilai *entrainment ratio* dapat meningkatkan nilai *COP* sistem refrigerasi. Sampai saat ini para peneliti dan ahli *engineer* belum menemukan parameter geometri yang tepat yang dapat dijadikan sebagai acuan untuk meningkatkan kinerja *ejector* sehingga *COP* sistem lebih optimal. Untuk itu perlu dilakukan penelitian karakteristik dan desain efisien dengan memodifikasi bentuk geometri ejektornya yaitu sudut *converging duct* pada *mixing chamber* dan panjang *constan-area-section* (*throat section*) sehingga nantinya dapat digunakan sebagai dasar untuk meningkatkan nilai *entrainment ratio* sehingga nilai *COP* siklus dapat dioptimalkan.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh perubahan sudut *converging duct* ( $\theta$ ) dan panjang *constan-area section* ( $L_T$ ), terhadap *entrainment ratio* dan *COP* sistem refrigerasi *steam ejector*.

Sementara kontribusi yang diharapkan dalam penelitian ini adalah untuk memberikan informasi ilmiah tentang efek sudut *converging duct* dan panjang *constant-area section* terhadap performa sistem refrigerasi *steam ejector* sehingga penetapan sudut *converging duct* dan panjang *constan-area section* dapat dijadikan acuan untuk mendapatkan performa yang optimal.

## 2. METODE PENELITIAN

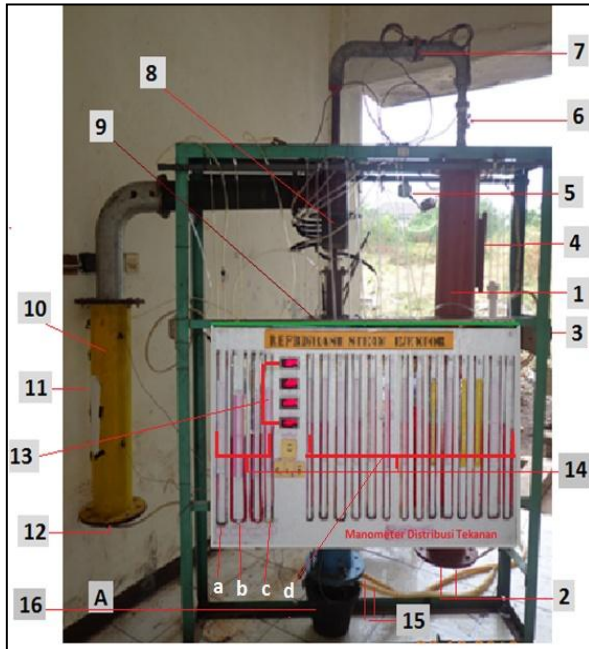
Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental. Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah Kondisi awal operasi merupakan variabel tetap yaitu tekanan dan temperatur boiler masing –masing  $5 \text{ kg/cm}^2$ ,  $151^\circ\text{C}$ , Temperatur evaporator  $97^\circ\text{C}$ , Diameter *constant-area section* ( $D$ ) 18 mm, geometri *primary nozzle* dengan diameter *throat* 3 mm. Variasi sudut *converging duct*:  $3^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $7,5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $18^\circ$  dan panjang *constant-area section*:  $2D(36 \text{ mm})$ ,  $3D(54 \text{ mm})$ ,  $4D(72 \text{ mm})$ ,  $5D(90 \text{ mm})$  sebagai variabel bebas. Tekanan dan temperatur evaporator merupakan variabel respon.

### 2.1. Prosedur Penelitian

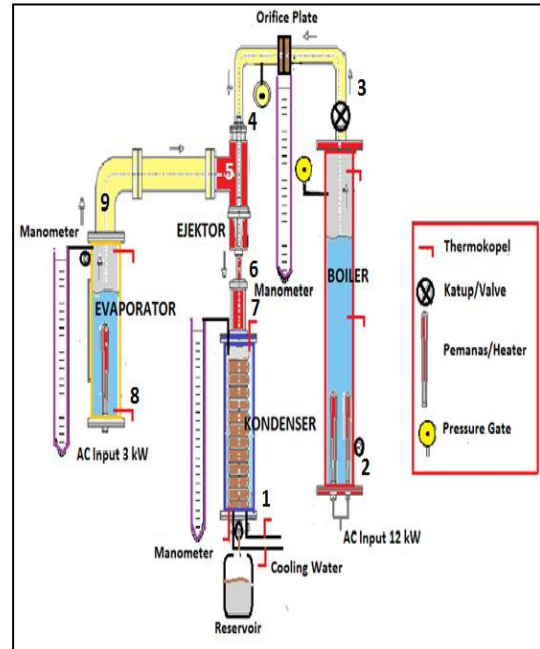
Eksperimen dimulai dengan cara memanaskan air dalam boiler sampai mencapai  $6 \text{ kg/cm}^2$  , , dan Temperatur evaporator mencapai titik didid air pada temperatur  $97^\circ\text{C}$ , kemudian *gate valve* pada  *boiler* dibuka secara perlahan sampai tekanan dan temperatur  *boiler* mencapai tekanan konstan  $5 \text{ kg/cm}^2$ ,  $151^\circ\text{C}$  kemudian catat perubahan temperatur air dan temperatur uap pada  *evaporator*, beda level air raksa pada *manometer orifice flowmeter* untuk menghitung laju aliran massa pada *primary flow*, waktu dan perubahan level air pada tabung ukur  *evaporator* untuk menghitung perubahan volume dan laju aliran massa pada *secondary flow*. Lakukan pengukuran sebanyak 3 kali pada setiap variasi sudut dinding *converging duct* dan panjang *constan-area section* *steam ejector* yang ditentukan.

### 2.2. Skema dan Peralatan Pengujian

Skema dan foto alat uji pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2 dan 3. Bentuk geometri ejektor dalam penelitian seperti ditunjukkan pada gambar 4.



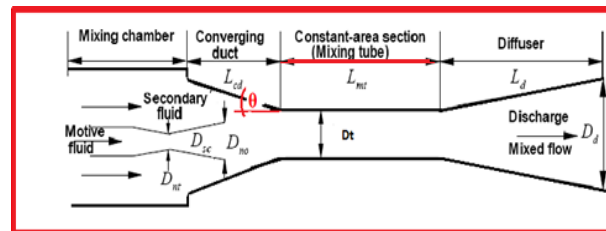
Gambar 2. Foto alat uji refrigerasi steam ejector



Gambar 3. Skema alat uji

Keterangan :

- |                              |                            |
|------------------------------|----------------------------|
| 1. Boiler                    | 9. Condensor               |
| 2. Water heater boiler 12 kW | 10. Evaporator             |
| 3. Saklar water heater       | 11. Gelas ukur evaporator  |
| 4. Gelas ukur boiler         | 12. Water Heater evap. 3KW |
| 5. Pressure Gauge            | 13. Display temperatur     |
| 6. Gate valve                | 14. Manometer(a,b,c,d)     |
| 7. Orifice Plate Flowmeter   | 15. Cooling water          |
| 8. Steam Ejector             | 16. Reservoir              |



Gambar 4. Bentuk geometri steam ejector dalam penelitian

2.3 Perhitungan

2.3.1 Entrainment ratio ( $\omega$ )

Entrainment ratio ( $\omega$ ) adalah kinerja ejector, dihitung menggunakan persamaan 1 yaitu:

$$\omega = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_p} \tag{1}$$

Dimana:  $\dot{m}_s$  = Laju aliran massa uap dari evaporator (*secondary flow*)

$\dot{m}_p$  = Laju aliran massa uap dari boiler melalui *primary* nozzle (*primary flow*)

### 2.3.2 Performansi (COP) Sistem Refrigerasi *Steam Ejector*

COP sistem refrigerasi *steam ejector* adalah rasio dari beban panas *evaporator* dan jumlah dari masukan energi *boiler* dan kerja pompa. COP sistem untuk siklus tertutup dihitung menggunakan persamaan 2 (Meyer J.A, 2009).

$$COP = \frac{\text{heat absorbed at the evaporator}}{\text{heat input at the boiler} + \text{Pump work}}$$

$$COP = \frac{Q_{evap}}{Q_{boiler} + W_{pump}} \approx \frac{P_{evap(elec)}}{P_{boiler(elec)}} \quad (2)$$

Kerja pompa dapat diabaikan karena sangat kecil yaitu sekitar 1% dibanding panas yang dibutuhkan boiler (Meyer J.A, 2006., Aphornatana S and Eames IW, 1997), sehingga persamaan 2 menjadi (Meyer J.A, 2006):

$$COP = \frac{Q_{evap}}{Q_{boiler}} \approx \frac{P_{evap(elec)}}{P_{boiler(elec)}} \quad (3)$$

atau

$$COP = \omega \frac{h_{g-Evap} - h_{f-Cond}}{h_{g-Boiler} - h_{f-Cond}} \quad (4)$$

Untuk siklus terbuka, seperti yang dijelaskan dalam makalah ini dimana air hasil kondensasi tidak disirkulasikan kembali ke boiler dan ke evaporator, maka COP sistem dapat dihitung menggunakan persamaan 5 (Meyer J.A, 2009).

$$COP_{elec} = \frac{P_{evap(elec)}}{P_{boiler(elec)}} \approx \omega \frac{h_{fg-evap}}{h_{fg-boiler}} \quad (5)$$

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Data Hasil Eksperimen

Data hasil eksperimen yang didapatkan dari hasil percobaan menggunakan mesin refrigerasi *steam ejector* disajikan pada tabel 1.

Tabel 1. Data hasil eksperimen pada tekanan boiler  $5 \text{ kg/cm}^2$ , temperature boiler  $151 \text{ }^\circ\text{C}$  dan laju aliran massa *primary flow* ( $\dot{m}_p$ )  $0,005344 \text{ kg/s}$

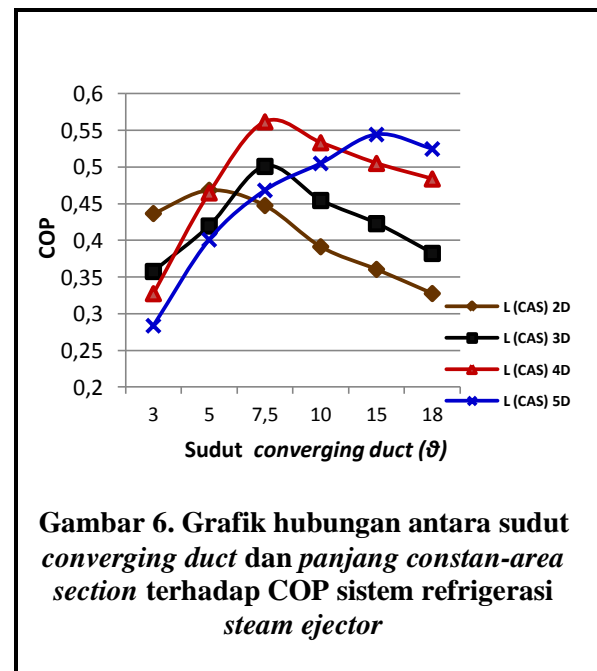
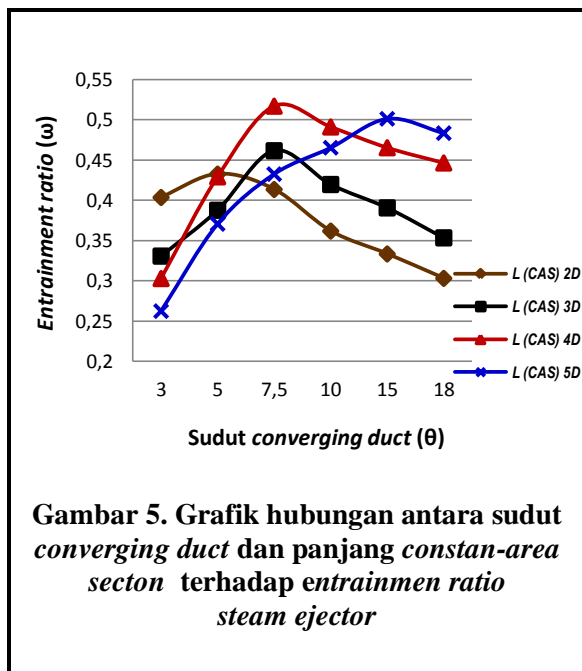
Sudut CD	L CAS	P <sub>Evap</sub> (cm Hg)	T <sub>Evap</sub> (°C)	$\dot{m}_s$ (kg/s)	L CAS	P <sub>Evap</sub> (cm Hg)	T <sub>Evap</sub> (°C)	$\dot{m}_s$ (kg/s)
3°	2D (36mm)	-4.73	89.67	0.002158	4D (72mm)	-4.07	90.67	0.00162
5°		-5.03	89	0.002313		-5.03	89	0.002295
7,5°		-4.77	89.33	0.002211		-6.23	86	0.002764
10°		-4.53	90	0.001935		-5.97	86.67	0.002626
15°		-4.37	90.33	0.001783		-5.53	87	0.002488
18°		-3.93	90.67	0.001621		-5.27	88.33	0.002387
3°	3D (54mm)	-4.27	90.33	0.001769	5D (90mm)	-3.87	90.67	0.001404
5°		-4.83	89.33	0.002073		-4.57	90	0.001982
7,5°		-5.63	87	0.002468		-5.23	89.33	0.002313
10°		-5.27	89	0.002244		-5.87	87	0.002488
15°		-4.87	89.33	0.002089		-6.07	86.33	0.00268
18°		-4.47	90	0.00189		-5.87	87	0.002585

Keterangan: L<sub>CAS</sub> = Panjang Constant-Area Section

### 3.2 Efek Perubahan Sudut *Converging Duct Steam Ejector* terhadap COP Sistem Refrigerasi *Steam Ejector*

Grafik pada Gambar 5 dan 6 menunjukkan pengaruh sudut *converging duct* terhadap performa *steam ejector* (*entrainment ratio*) dan COP sistem. Perubahan sudut *converging duct* mempengaruhi nilai *entrainment ratio steam ejector*, perubahan *entrainment ratio steam ejector* juga mempengaruhi COP sistem refrigerasi *steam ejector*. Meningkatnya sudut *converging duct* pada panjang *constant-area section* yang sama menyebabkan nilai *entrainment ratio steam ejector* dan COP sistem meningkat, kemudian menurun dengan mengacu pada peningkatan sudut konvergennya. .

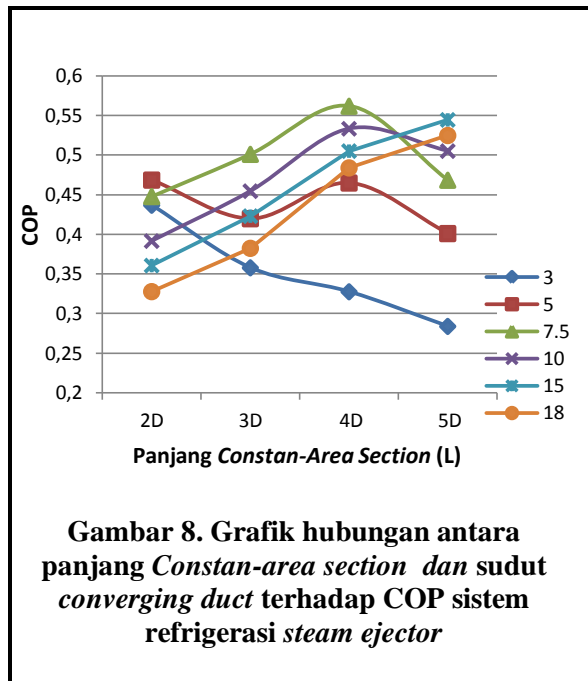
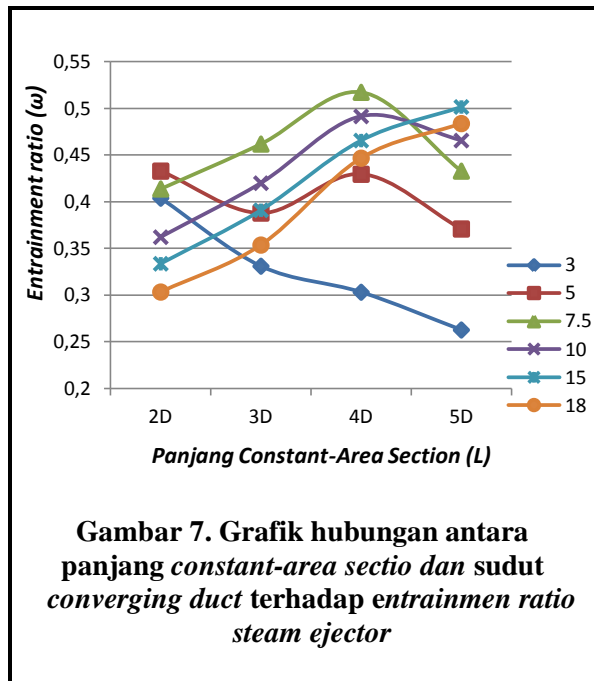
Pada penelitian ini nilai maksimal *entrainment ratio steam ejector* dan COP sistem dicapai pada sudut *converging duct*  $7,5^\circ$  dengan panjang *constant-area section* 4D(72 mm) dengan nilai masing-masing 0,5172 untuk *entrainment ratio* dan 0,5619 untuk COP sistem. Karena daerah ini menghasilkan daerah vakum yang optimal dengan tekanan yang terjadi pada *constant-area section* yang semakin rendah menyebabkan jumlah laju aliran massa *suction* yang terhisap semakin banyak sehingga nilai *entrainment ratio* meningkat. Nilai *entrainment ratio steam ejector* dan koefisien kinerja sistem terendah diperoleh pada panjang *constant-area section* 2D(36 mm) dengan nilai masing-masing 0,4137 dan 0,4478.



#### 4.1.2 Efek Perubahan Panjang *Constant Area Section Steam Ejector* terhadap COP Sistem Refrigerasi *Steam Ejector*

Grafik pada Gambar 7 dan 8 menunjukkan efek perubahan panjang *constant-area section* terhadap performa *steam ejector* (*entrainment ratio*) dan COP sistem refrigerasi *steam ejector*. Perubahan ukuran panjang *constant-area section* pada sudut *converging duct* yang sama menghasilkan nilai *entrainment ratio* dan COP sistem yang berbeda-beda. Meningkatnya panjang *constant-area section* pada sudut *converging duct* yang sama menghasilkan nilai *entrainment ratio* dan COP sistem cenderung meningkat, kecuali pada sudut *converging duct*  $3^\circ$  masing-masing mengalami penurunan.

Pada sudut *converging duct*  $7,5^\circ$  nilai *entrainment ratio* dan COP sistem minimum pada panjang *constant-area section* 2D(36 mm) dengan nilai masing-masing 0,4137 dan 0,4478 dan mengalami peningkatan dengan meningkatnya panjang *constant-area section* sampai pada panjang 4D(72 mm) dengan nilai masing-masing sebesar 0,5172 untuk *entrainment ratio* dan 0,5619 untuk COP sistem, kemudian menurun pada panjang 5D(90 mm) dengan nilai masing-masing 0,4328 dan 0,4685.



#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil eksperimen dan analisis yang dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Perubahan sudut *converging duct* dan panjang *constan-area section* pada tekanan konstan mempengaruhi nilai *entrainment ratio ejector* dan koefisien performa (COP) sistem refrigerasi *steam ejector*.
2. Semakin tinggi sudut *converging duct* dan semakin panjang *constant-area section* pada tekanan  *motive* 5 kg/cm<sup>2</sup>, semakin besar daerah vakum yang dihasilkan pada ejector menyebabkan laju aliran massa *secondary flow* yang terhisap dari evaporator semakin banyak dan tekanan pada *evaporator* semakin rendah sehingga nilai *entrainment ratio*, nilai COP sistem, mengalami peningkatan.
3. Nilai *entrainment ratio ejector* dan COP sistem optimal diperoleh pada geometri sudut *converging duct* 7,5° dengan panjang *constan-area section* 4D (72 mm) dengan nilai masing-masing 0,5172 dan 0,5619. Dan terendah pada sudut *converging duct* 3° dengan panjang *constan-area section* 5D (90 mm) dengan nilai masing-masing 0,2627 dan 0,2839.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Aphornratana, S and Eames, I.W., 1997, "A small capacity steam- ejector refrigerator: experimental Investigation of a system using ejector with movable primary nozzle", *International Journal of Refrigeration*, vol. 20 (5), pp 352–358.
- Chunnanond K, Aphornratana S., 2004, "An experimental investigation of steam-ejector refrigerator: the analysis of pressure profile along ejector," *Applied Thermal Engineering* 24, pp.311-322
- De-Frate, L. A. and Hoerl, A. E., 1959, "Optimum Design of Ejectors Using Digital Computers," *Computer Techniques, Chemical Engineering Progress Symposium Series*, 55(21), pp.43-51.
- Elbel, S and Hrnjak, P, 2008, "Ejector Refrigeration: An Overview of Historical and Present Developments with an Emphasis on Air-Conditioning Applications" *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. Paper 884
- Kim, H. D., Setoguchi, T., S, Yu., and Raghunathan, S., 1999, "Navier-Stokes Computations of the Supersonic Ejector-Diffuser System with a Second Throat," *Journal Thermal. Science.*, 8, 2.
- Meyer, A. J., 2006, "Steam Jet Ejector Cooling Powered by Waste or Solar Heat". Master Thesis in Mechanical Engineering Stellenbosch University, Matieland 7602, South Africa.