

ANALISA PENGARUH POSISI KELUARAN NOSEL PRIMER TERHADAP PERFORMA STEAM EJECTOR MENGGUNAKAN CFD

Tony Suryo Utomo*, Sri Nugroho, Eflita Yohana
Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
*Email: msktonysu@yahoo.co.id

ABSTRAK

Steam ejector refrigerasi merupakan sistem refrigerasi dengan memanfaatkan panas buangan sebagai inputnya. Steam ejector berperan sebagai pengganti kompresor pada siklus kompresi uap. Steam ejector refrigerasi memiliki COP (Coefficient of Performance) yang rendah, sehingga perlu dilakukan penelitian untuk mengoptimalkan kinerja dari steam ejector. Kinerja steam ejector dapat dilihat dari besarnya nilai entrainment ratio yaitu perbandingan laju aliran massa suction dengan laju aliran massa motive. Peningkatan nilai entrainment ratio pada steam ejector dapat meningkatkan COP dari sistem refrigerasi tersebut. Dalam penelitian ini, Computational Fluid Dynamics (CFD) digunakan untuk memprediksi fenomena aliran dan performansi steam ejector. Simulasi dilakukan dengan memodifikasi posisi keluaran nosel primer yaitu jarak nosel dengan constant-area section steam ejector. Jarak nosel dengan constant-area (throat) section steam ejector divariasikan dari 0.1 sampai 5 kali diameter constant-area section. Hasil simulasi menunjukkan performansi optimum diperoleh pada jarak nosel antara 1.5 sampai 4 kali diameter constant-area section. Semakin besar diameter throat nosel maka nilai entrainment ratio semakin menurun.

Kata kunci: *Steam ejector, entrainment ratio, Computational Fluid Dynamics, Coefficient of Performance*

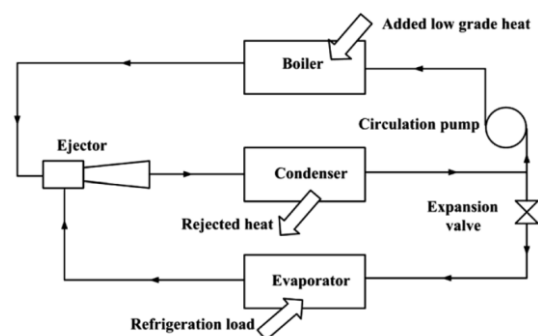
PENDAHULUAN

Sistem refrigerasi pada umumnya didominasi oleh sistem kompresi mekanis. Energi listrik yang dibutuhkan untuk menggerakkan kompresor mekanis sangatlah besar. Terutama ketika beban pendinginannya besar. Disisi lain, terdapat sejumlah besar energi termal tingkat rendah di lingkungan yang juga memerlukan proses refrigerasi seperti halnya yang biasa terjadi pada industri kimia, makanan maupun pada industri umum yang lain. Dalam situasi semacam ini, diperlukan sistem refrigerasi yang sumber energinya dapat memanfaatkan sumber-sumber energi termal tingkat rendah tersebut. Sistem refrigerasi ejector tampak sangat tepat untuk diaplikasikan pada kondisi-kondisi semacam ini karena sistem ini relatif sederhana dan dapat memanfaatkan energi termal tingkat rendah atau panas buangan.

Sistem refrigerasi ejector pertama kali dikembangkan oleh Maurice Leblanc pada tahun 1910 (Chunnanond dkk, 2004). Sistem refrigerasi ini memiliki keunggulan lain selain dapat memanfaatkan energi termal tingkat rendah yaitu hanya memiliki sedikit bagian yang bergerak karena tidak menggunakan kompresor. Sehingga sangat handal dan murah dalam biaya operasional maupun perawatannya. Sistem refrigerasi ejector ini juga dapat menggunakan air sebagai refrigeran sehingga sangat ramah lingkungan. Namun demikian, sistem ini memiliki kelemahan yaitu COP (*coefficient of performance*) yang sangat rendah.

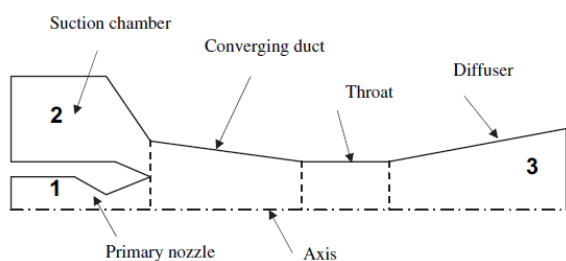
Gambar 1 menunjukkan siklus operasi sistem refrigerasi ejector. Jikadibandingkan dengan sistem refrigerasi kompresi uap pada umumnya, tampak bahwa ejector, boiler (steam generator) dan pompa sirkulasi digunakan untuk menggantikan fungsi

kompresor. Siklus refrigerasi dimulai dari proses pendidihan dan penguapan cairan refrigeran di dalam boiler yang menghasilkan uap refrigerant bertekanan dan bertemperatur tinggi. Uap refrigeran yang berasal dari boiler ini disebut *motive fluid* atau *primary fluid* (fluida primer). Selanjutnya fluida primer mengalir melalui leher nosel pada kecepatan supersonic dan menciptakan daerah bertekanan rendah dimana daerah tersebut terkoneksi dengan evaporator. Sehingga refrigeran di dalam evaporator dapat dengan mudah mendidih dan menguap. Panas yang diserap di dalam evaporator inilah yang disebut sebagai kapasitas refrigerasi dari sistem refrigerasi ejector ini. Refrigeran yang mengalami evaporasi di dalam evaporator dan terhisap masuk ke dalam ejector disebut sebagai *suction fluid* atau *secondary fluid* (fluida sekunder). Fluida primer dan sekunder bercampur dan mengalir di dalam ejector menuju condenser. Sebagian refrigeran cair dari condenser selanjutnya dialirkan kembali menuju boiler menggunakan pompa, dan sisanya diteruskan melalui katup ekspansi dan evaporator untuk memenuhi proses dalam satu siklus refrigerasi.



Gambar 1. Siklus refrigerasi ejector.

Dapat diketahui bahwa performa pendinginan dari sistem refrigerasi *ejector* sangat tergantung pada performa *ejector* dalam menyerap aliran refrigeran dari evaporator (Rusly dkk, 2005). Dengan demikian untuk dapat meningkatkan COP sistem refrigerasi *ejector* diperlukan desain *ejector* performa tinggi. Pada prinsipnya, untuk mendapatkan performa sistem refrigerasi yang optimum, sistem harus dioperasikan pada kondisi operasi optimumnya. Kondisi operasi optimum ini bervariasi terhadap geometri *ejector* antara lain posisi keluaran nosel primer ejector. Gambar 2 menampilkan bagian-bagian utama dari *ejector*.

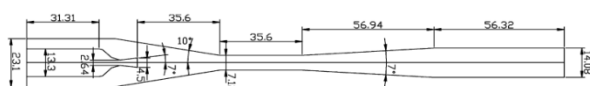


Gambar 2. Geometri *ejector*.

Sangatlah jelas bahwa nosel primer merupakan bagian terpenting dari *ejector* karena nosel bertanggung jawab dalam menciptakan kondisi vacuum di dalam *ejector* untuk menghisap fluida sekunder. Performa *ejector* dapat diketahui dari *entrainment ratio* yaitu perbandingan antara laju aliran sekunder terhadap primernya. Dengan demikian desain dan penelitian yang cermat pada geometri nosel menjadi tahap penting dalam upaya memperoleh desain ejector performa tinggi. Penelitian ini difokuskan pada investigasi pengaruh geometri dan posisi keluaran nosel primer terhadap performa ejector. Penelitian ini menggunakan metode analisa CFD (*Computational Fluid Dynamics*) yang didasarkan pada metode volume hingga.

Metoda Pemodelan CFD

Dalam penelitian ini, permasalahan yang menjadi fokus penelitian melibatkan aliran supersonic di dalam ejector. Untuk menyimulasikan kondisi aliran di dalam ejector ini GAMBIT digunakan sebagai penggenerasi grid domain simulasi dan FLUENT digunakan sebagai CFD solver.



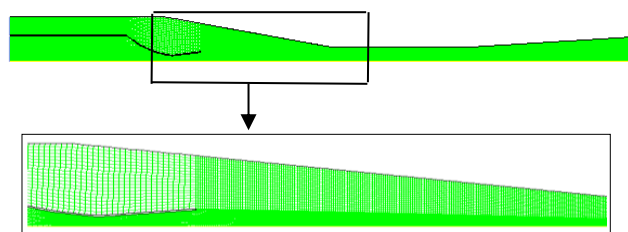
Gambar 3. Model dasar ejector nosel A.

Model *ejector* yang digunakan dalam simulasi ini adalah model *ejector* (*base model*) berdasarkan literature (Huang, 1999). Gambar 3 menunjukkan model dasar dari *ejector* menggunakan dimensi nosel A. Dalam penelitian ini *ejector* disimulasikan menggunakan variasi nosel A, E dan X dengan dimensi sebagaimana tercantum pada Tabel 1.

Tabel 1. Variasi Geometri Nosel

Nosel	Diameter throat, (mm)	Diameter nozzle, d_t (mm)	exit d_{pl}	Nosel Rasio (A_{pl} / A_t)
A	2,64	4,50		2,905
E	2,82	5,10		3,271
X	2.64	4		2,296

Dalam penelitian ini GAMBIT digunakan untuk membangun elemen-elemen grid model dan domain komputasi. Model dibangun dalam domain dua dimensi (2D). Meski demikian, dalam pemodelan ini diterapkan solver axisymmetric sehingga efek-efek tiga dimensi (3D) juga diperhitungkan dalam simulasi ini. Struktur grid yang digunakan adalah quadrilateral mesh dengan jumlah sel mencapai 48000 sebagaimana tampak pada Gambar 4.



Gambar 4. Mesh terstruktur quadrilateral grid pada domain komputasi.

Untuk aliran kompresibel turbulen axisymmetric, persamaan-persamaan pembangun seperti kontinuitas, momentum dan energy diselesaikan secara simultan dengan batasan hukum gas ideal. Model K epsilon RNG ($k-\epsilon$ RNG) dipilih untuk memodelkan viskositas turbulen dengan menerapkan *coupled-implicit solver*. Perlakuan di daerah dekat dinding (*near wall treatment*) mengadopsi persamaan *standard wall function*, yang memberikan hasil cukup akurat untuk aliran dengan bilangan Reynolds sangat tinggi.

Kondisi batas dari dua permukaan masuk nosel primer dan ejector didefinisikan sebagai *pressure-inlet*, sementara satu permukaan keluar ejector didefinisikan sebagai *pressure-outlet*. Karena kecepatan aliran masuk dan keluar relatif sangat kecil dibandingkan dengan kecepatan supersonic di dalam ejector, sehingga tidak ada perbedaan antara input tekanan stagnasi dan tekanan statis. Fluida kerja yang digunakan dalam simulasi ini adalah R141b dalam kondisi uap jenuh baik untuk fluida primer maupun sekunder.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4 merupakan data nilai *entrainment ratio* (ω) dari setiap variasi jarak nosel terhadap *constant-area section* untuk masing-masing nosel A, nosel E, dan nosel X.

Tabel 2. *Entrainment Ratio* Dari Variasi Jarak Nosel Pada Nosel A

Jarak nosel dengan constan area	mass flow rate		ER (ω)
	suction (kg/s)	motive (kg/s)	
0,1 D	0.0098602	0.0103413	0.9535
0,2 D	0.0105453	0.0102057	1.0333
0,3 D	0.0105942	0.0104865	1.0103
0,4 D	0.0106048	0.0103413	1.0255
0,5 D	0.0107260	0.0103415	1.0372
0,6 D	0.0108235	0.0103412	1.0466
0,7 D	0.0110525	0.0103411	1.0688
0,8 D	0.0113361	0.0103413	1.0962
0,9 D	0.0112421	0.0103413	1.0871
1,25 D	0.0112421	0.0103413	1.0871
1,5 D	0.0112421	0.0103413	1.0871
2 D	0.0111843	0.0103413	1.0815
3D	0.0116346	0.0103413	1.1251
4D	0.0114495	0.0103413	1.1072
5D	0.011398	0.010486	1.0870

Tabel 3. *Entrainment Ratio* Dari Variasi Jarak Nosel Pada Nosel E.

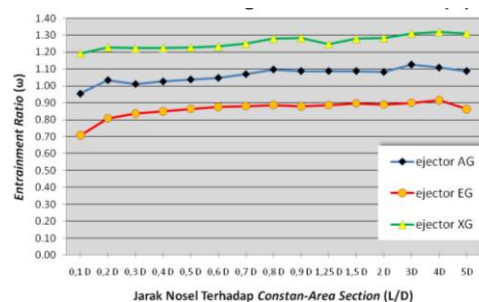
Jarak nosel dengan constan area	mass flow rate		ER (ω)
	suction (kg/s)	motive (kg/s)	
0,1 D	0.0082210	0.0116346	0.7066
0,2 D	0.0093990	0.0116346	0.8079
0,3 D	0.0097226	0.0116346	0.8357
0,4 D	0.0098818	0.0116346	0.8493
0,5 D	0.0100462	0.0116346	0.8635
0,6 D	0.0101924	0.0116359	0.8759
0,7 D	0.0102414	0.0116313	0.8805
0,8 D	0.0103180	0.0116346	0.8868
0,9 D	0.0102237	0.0116346	0.8787
1,25 D	0.0103235	0.0116317	0.8875
1,5 D	0.0104383	0.0116346	0.8972
2 D	0.0103739	0.0116615	0.8896
3D	0.0105032	0.0116615	0.9007
4D	0.0106515	0.0116345	0.9155
5D	0.0102590	0.0119040	0.8618

Tabel 4. *Entrainment Ratio* Dari Variasi Jarak Nosel Pada Nosel X.

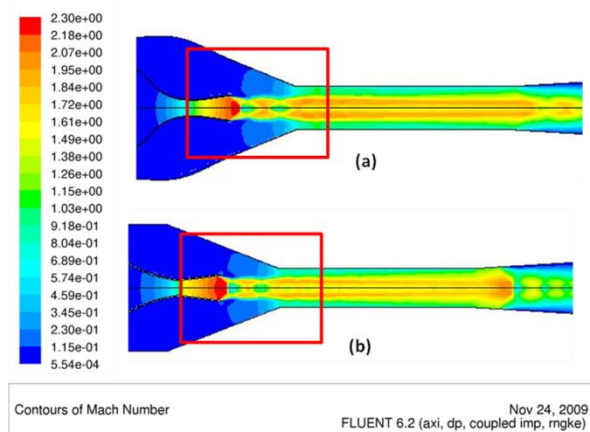
Jarak nosel dengan constan area	mass flow rate		ER (ω)
	suction (kg/s)	motive (kg/s)	
0,1 D	0.0110813	0.0093139	1.1898
0,2 D	0.0114030	0.0092976	1.2264
0,3 D	0.0113544	0.0092941	1.2217
0,4 D	0.0113694	0.0092942	1.2233
0,5 D	0.0113897	0.0092941	1.2255
0,6 D	0.0114589	0.0092940	1.2329
0,7 D	0.0116193	0.0092971	1.2498
0,8 D	0.0118968	0.0092945	1.2800
0,9 D	0.0119266	0.0092944	1.2832
1,25 D	0.0116008	0.0092976	1.2477
1,5 D	0.0118919	0.0092946	1.2794
2 D	0.0119227	0.0092958	1.2826
3D	0.0121853	0.0092977	1.3106
4D	0.0122704	0.0092978	1.3197
5D	0.0121816	0.0092945	1.3106

Dari data *entrainment ratio* (ω) pada tabel diatas, hasil simulasinya kemudian diplotkan dalam grafik sehingga diketahui jarak optimal yang menghasilkan nilai *entrainment ratio* terbaik dari setiap variasi jarak nosel terhadap *constant-area section*. Gambar 5 memperlihatkan grafik dari nilai *entrainment ratio* dari nosel A, nosel E, dan nosel X untuk setiap variasi jarak nosel.

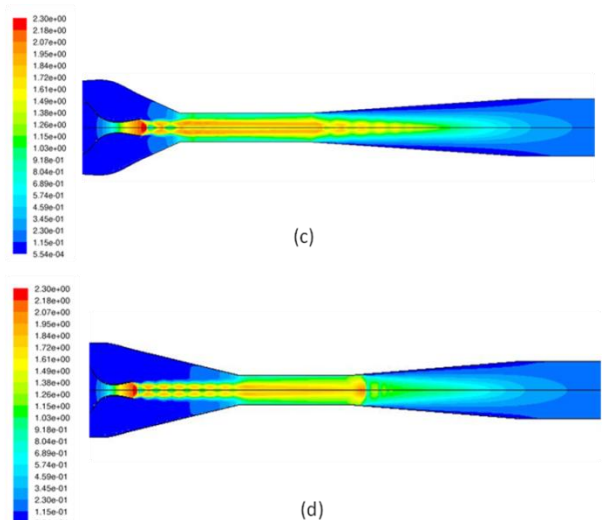
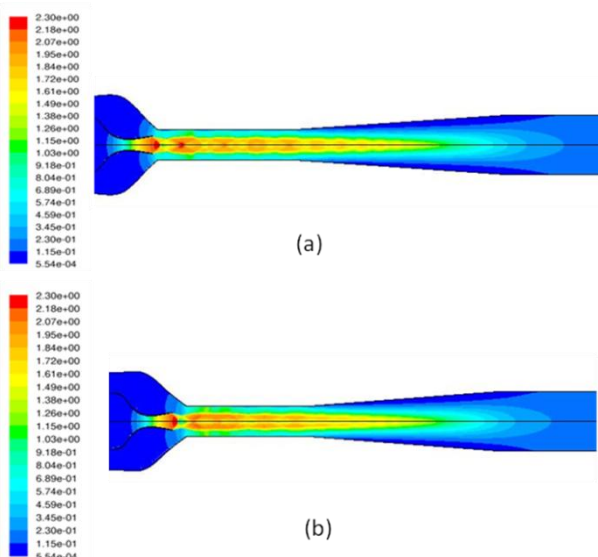
Dari data-data hasil simulasi diatas dapat diketahui bahwa nilai *entrainment ratio* paling besar terjadi pada *ejector* nosel X. Pada nosel X yang memiliki diameter throat dan discharge *primary* nosel yang lebih kecil dibandingkan nosel A dan nosel E, maka bilangan Mach *primary flow* pada saat keluar nosel semakin besar dan areanya kecil. Sehingga laju aliran massa *secondary flow* dapat lebih banyak masuk dalam *constant-area section*.

**Gambar 5.** Grafik Perbandingan nilai *entrainment Ratio* (ω) untuk berbagai model ejector pada *Critical Mode*.

Nilai *entrainment ratio* paling besar untuk setiap nosel diperoleh pada jarak nosel dan *constant-area section* antara 1,5D – 4D (1.5 – 4 kali diameter *constant-area section*). Peningkatan nilai *entrainment ratio* disebabkan oleh area *mixing chamber* yang semakin besar, sehingga laju aliran massa *secondary flow* pada *mixing chamber* semakin besar. Gambar 6 menunjukkan kontur bilangan Mach dari ejector nosel X (a) dan nosel A (b) pada variasi jarak nosel sebesar 1,5D. Dapat dilihat perbedaan besar area *jet core* yang dihasilkan oleh nosel A (b) dibandingkan dengan *jet core* yang dihasilkan pada nosel X (a). Sehingga laju aliran massa *secondary flow* lebih besar terjadi pada ejector nosel X.



Gambar 6. Kontur bilangan Mach pada jarak nosel dengan *Constant-Area Section* sebesar 1,5D (a) nosel X, (b) nosel A.



Gambar 7. Kontur bilangan Mach pada nosel X ; (a) jarak nosel 0,2D , (b) jarak nosel 0,6D , (c) jarak nosel 1,5D , (d) jarak nosel 5D.

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 *ejector*. Nilai *entrainment ratio* juga ditentukan oleh besarnya area *mixing chamber*, semakin kecil area *mixing chamber* maka *effective area secondary flow* dan fluks aliran *primary* menarik aliran dari *suction* semakin kecil sehingga nilai *entrainment ratio* yang dihasilkan semakin kecil. Hal tersebut ditunjukkan oleh Gambar 7, semakin besar area *mixing chamber* maka fluks massa *secondary flow* semakin besar dan akan meningkatkan nilai *entrainment ratio*. Nilai *entrainment ratio* akan kembali menurun setelah jarak nosel dengan *constant area section* pada 4 kali diameter *constant area section* (*throat section*). Hal ini disebabkan tekanan dan temperatur *motive* dan *suction* tidak terlalu besar untuk membentuk profil kecepatan yang seragam sehingga menambah total kehilangan energi di *ejector diffuser*.

KESIMPULAN

Dari hasil simulasi dan pembahasan diatas dapat ditarik kesimpulan bahwa performa terbaik diperoleh pada ejector nosel X dengan diameter throat 2,64 mm dan area ratio 2,3. Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa semakin besar diameter throat nosel maka nilai *entrainment ratio* steam ejector menjadi semakin rendah.

Jarak nosel dengan *constant-area section* berpengaruh pada performansi kerja *steam ejector*, performansi optimum dicapai pada jarak nosel dengan *constant-area section* antara 1.5 sampai dengan 4 kali diameter *constant-area section* (1.5D sampai dengan 4D).

Ucapan Terima kasih

Penelitian ini secara financial didukung oleh DIPA FT
UNDIP

REFERENSI

1. Chunnanond K, Aphornratana S. Ejecors: application in refrigeration technology. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 8, 129-155 (2004).
2. Huang BJ, Chang JM, Wang CP, Petrenko VA. A 1D analysis of ejector performance. Int J Refrigeration. Vol. 22, 354–364 (1999).
3. Rusly E, Aye L, Charters WWS, Ooi A. CFD analysis of ejector in a combined ejector cooling system. Int J Refrigeration. Vol. 28, 1092–1101 (2005)