

## Analisa CFD Pada Pengaruh Geometri Nosel Terhadap Performa *Steam Ejector*

Tony Suryo Utomo

Jurusan Teknik Mesin  
Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedharto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang

Telp. : +62-24-7460059, Fax : +62-24-7460059, E-mail: msktonysu@yahoo.co.id

### Abstrak

Dalam penelitian ini, Computational Fluid Dynamics (CFD) digunakan untuk memprediksi pengaruh geometri nosel dan kondisi operasi terhadap performa suatu *steam ejector*. Simulasi dilakukan dengan memodifikasi geometri nosel dan memvariasikan kondisi operasi tekanan dan temperatur dari  *motive* (boiler) dan *suction* (evaporator). Geometri nosel yang divariasikan adalah diameter throat dan area ratio. Terdapat dua macam variasi diameter throat yaitu 2,64 mm dan 2,82 mm dengan 3 macam variasi area ratio yakni 2,3, 2,9 dan 3,3. Fluida kerja berada pada kondisi uap jenuh dengan variasi temperatur  *motive* pada 85°C, 95°C, dan 115°C sedangkan variasi temperatur *suction* yang diberikan yaitu 27°C, 32°C, dan 35°C. Hasil simulasi menunjukkan performa terbaik diperoleh pada geometri nosel 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. Sedangkan untuk variasi kondisi operasi, semakin tinggi temperatur  *motive* maka nilai entrainment ratio semakin kecil, sebaliknya semakin tinggi temperatur *suction* maka nilai entrainment ratio semakin besar.

**Keywords:** CFD, Steam Ejector, Geometri Nosel, Entrainment Ratio, Kondisi Operasi

### Pendahuluan

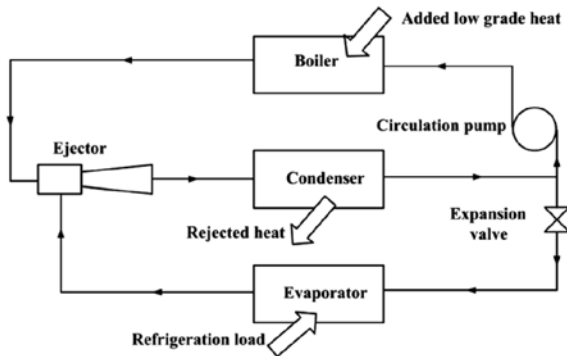
Sistem refrigerasi pada umumnya didominasi oleh sistem kompresi mekanis. Energi listrik yang dibutuhkan untuk menggerakkan kompresor mekanis sangatlah besar. Terutama ketika beban pendinginannya besar. Disisi lain, terdapat sejumlah besar energi termal tingkat rendah di lingkungan yang juga memerlukan 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.

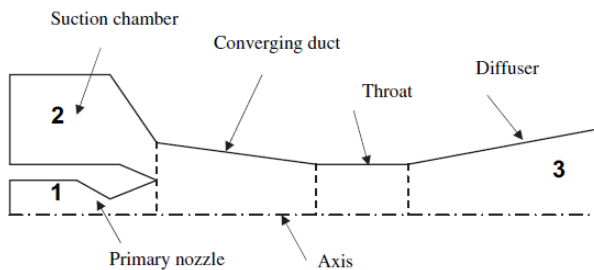
Gambar 1 menunjukkan siklus operasi sistem refrigerasi *ejector*. Jika dibandingkan dengan sistem refrigerasi kompresi uap pada umumnya, tampak bahwa *ejector*, boiler (*steam generator*) dan pompa sirkulasi digunakan untuk menggantikan fungsi kompresor. Siklus refrigerasi dimulai dari proses pendidihan dan penguapan cairan refrigeran di dalam boiler yang menghasilkan uap refrigeran bertekanan dan bertemperatur tinggi. Uap refrigeran yang berasal dari boiler ini disebut  *motive fluid*  atau *primary fluid* (fluida primer). Selanjutnya fluida primern 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 dan bagian-bagian dari ejector tersebut dalam hal ini geometri nosel primer. Gambar 2 menampilkan bagian-bagian utama dari ejector.



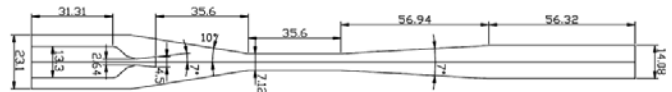
Gambar 2. Geometri ejector.

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 nosel primer terhadap performa ejector. Pengaruh tekanan dan temperature boiler dan evaporator juga diselidiki dalam penelitian ini. 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.



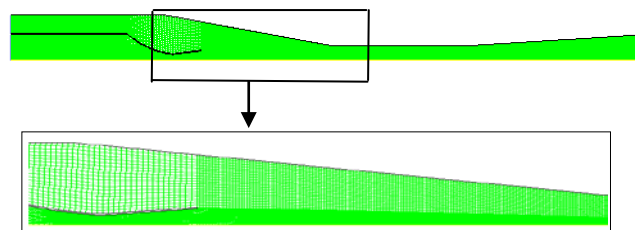
Gambar 3. Model dasar ejector nosel A.

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, $d_t$ (mm)	Diameter exit nozzle, $d_{pl}$ (mm)	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.

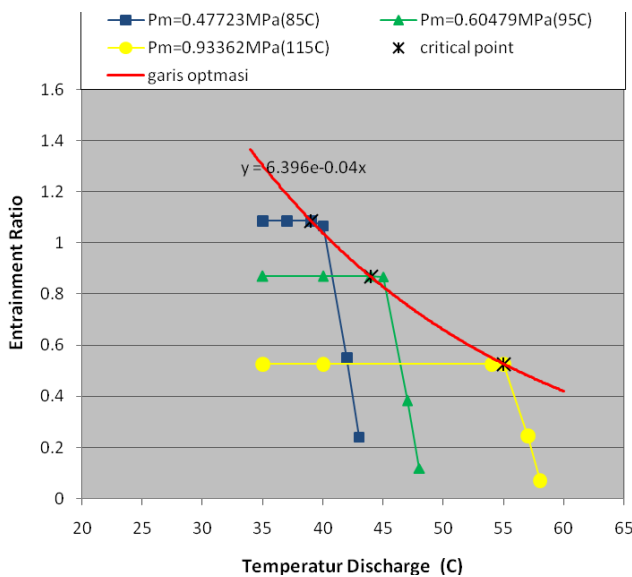
Untuk aliran kompresibel turbulen axisymmetric,

persamaan-persamaan pembangun seperti kontinuitas, momentum dan energy diselesaikan secara simultan dengan batasan hukum gas ideal. Model K epsilon RNG (k-ε 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 domain 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**

**Efek Temperatur dan Tekanan Boiler (Motive)**

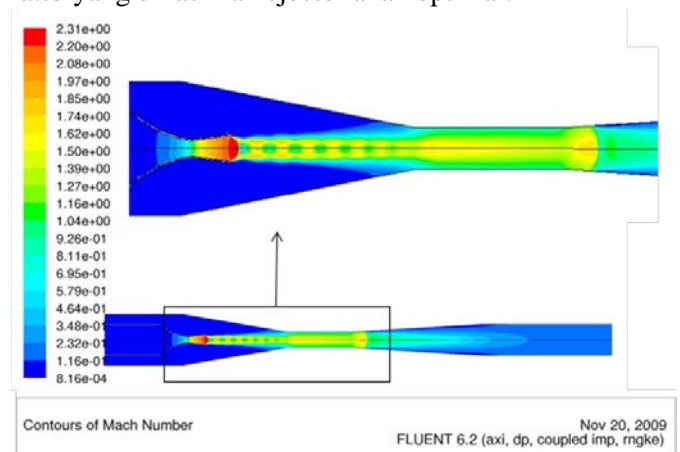
Temperatur boiler atau *motive* ( $T_m$ ) dan tekanan *motive* ( $P_m$ ) divariasikan pada  $P_m=0.47723\text{MPa}(85^\circ\text{C})$ ,  $P_m=0.60479\text{MPa}(95^\circ\text{C})$ , dan  $P_m=0.93362\text{MPa}(115^\circ\text{C})$  agar diketahui pengaruhnya terhadap nilai *entrainment ratio* ( $\omega$ ). Variasi tekanan boiler ini juga dimaksudkan untuk mendapatkan kondisi operasi yang terbaik atau kondisi operasi pada mode kritis (*critical mode*) untuk setiap nosel. Sementara itu temperature dan tekanan evaporator dijaga tetap konstan pada  $P_s=0.10116\text{MPa}(32^\circ\text{C})$ .



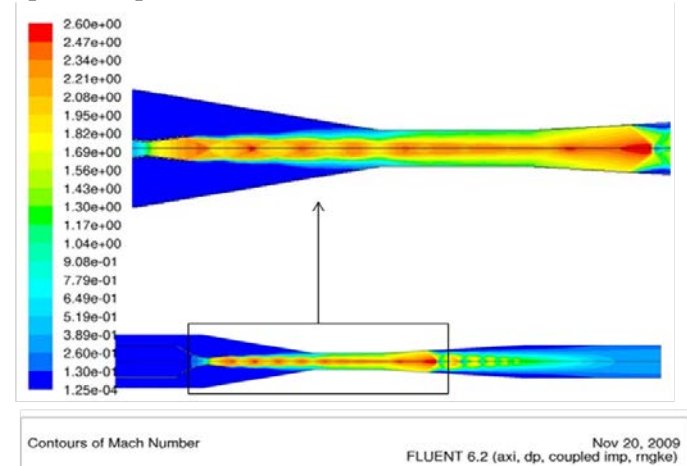
**Gambar 5.** Grafik performansi operasi model ejector nosel A pada berbagai tekanan boiler (*Motive*).

Gambar 5 memperlihatkan hasil simulasi model

ejector nosel A, didapatkan nilai *entrainment ratio* ( $\omega$ ) untuk setiap variasi tekanan dan temperatur pada boiler dan kondensor. Dari gambar tersebut tampak bahwa nilai *kritisentrainment ratio* ( $\omega$ ) yang diperoleh bergantung pada tekanan boiler (*motive*). Semakin tinggi tekanan boiler menghasilkan nilai *entrainment ratio* ( $\omega$ ) yang semakin rendah. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi temperatur dan tekanan pada *primary flow* akan menghasilkan bilangan Mach yang semakin tinggi dan *jet core* atau *primary-flow core* yang semakin besar. Kondisi ini mengakibatkan *effective area secondary flow* yang semakin kecil yang berujung pada fluks aliran massa sekunder yang semakin kecil. Di sisi lain, tekanan boiler yang semakin tinggi mengakibatkan fluks aliran massa primer yang semakin tinggi pula sehingga menghasilkan nilai *entrainment ratio* yang semakin kecil. Namun demikian dengan semakin tingginya tekanan boiler memberikan efek pada kemampuan ejector untuk tetap beroperasi pada kondisi optimumnya pada tekanan condenser yang lebih tinggi. Kondisi operasi terbaik didapat dari garis optimasi hasil simulasi, karena garis optimasi terletak pada mode kritis (*critical mode*) maka nilai *entrainment ratio* yang dihasilkan ejector akan optimal.

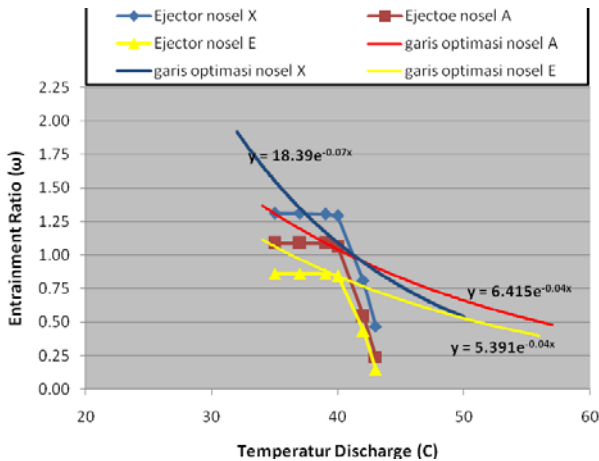


**Gambar 6.** Kontur bilangan Mach *steam ejector* nosel A pada temperatur boiler 85°C.



**Gambar 7.** Kontur bilangan Mach *steam ejector* nosel A pada temperatur boiler 115°C.

Gambar 6 dan Gambar 7 menampilkan kontur bilangan Mach yang mengilustrasikan fenomena *jet core* pada ejector nosel A masing-masing pada temperatur boiler 85°C dan 115°C. Dari kedua gambar tersebut dapat diketahui bahwa ejector yang dioperasikan pada temperatur boiler yang lebih tinggi menghasilkan *jet core* yang lebih besar sehingga mempersempit luasan *effective area*-nya.



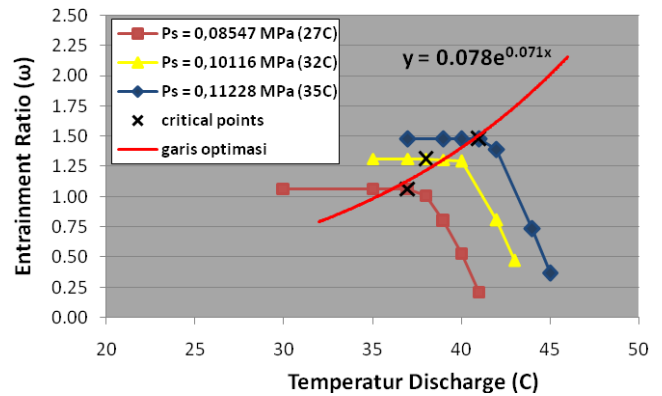
**Gambar 8.**Perbandingan grafik performansi operasi optimal dari model ejector nosel A, E dan X berdasarkan variasi tekanan boiler.

Gambar 8 menunjukkan perbandingan garis optimasi *entrainment ratio* ejector untuk ketiga model nosel pada kondisi operasi yang sama. Dari gambar diatas terlihat bahwa nilai *entrainment ratio* terbesar diperoleh pada model *ejector* nosel X. Hal ini sangat mungkin disebabkan oleh kenyataan bahwa diameter *throat* nosel X yang lebih kecil sehingga mengakibatkan peningkatan bilangan Mach pada sisi keluarannosel. Peningkatan kecepatan ini menghasilkan tekanan yang semakin rendah sehingga memberikan efek hisap yang lebih besar pada sisi evaporator. Disamping itu, area ratio yang kecil pada nosel X menghasilkan *jet core* yang lebih ramping yang berakibat pada semakin besarnya *effective area secondary flow* pada *mixing chamber* dan *constant-area duct*. Kondisi ini dapat meningkatkan fluks aliran massa *secondary flow* sehingga menghasilkan *entrainment ratio* yang lebih besar.

**Efek Temperatur dan Tekanan Evaporator (Suction)**

Pada simulasi tahap ini temperatur evaporator atau *suction* ( $T_s$ ) dan tekanan *suction* ( $P_s$ ) divariasikan pada  $P_s=0.084570\text{MPa}(27\text{C})$ ,  $P_s=0.10116\text{MPa}(32\text{C})$ ,  $P_s=0.11228\text{MPa}(35\text{C})$  agar diketahui pengaruhnya terhadap nilai *entrainment ratio* ( $\omega$ ), serta mendapatkan kondisi operasi yang terbaik atau kondisi operasi pada mode kritis (*critical mode*) untuk setiap nosel. Sementara itu tekanan boiler dijaga tetap

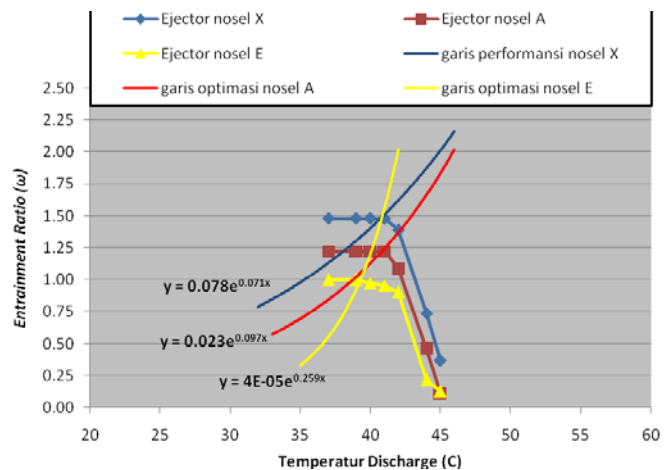
konstan pada  $P_m=0,47723\text{ MPa}$  (85C).



**Gambar 9.** Grafik performansi operasi model ejector nosel X pada berbagaitekanan evaporator (*suction*).

Gambar 9 memperlihatkan hasil simulasi model ejector nosel X pada berbagai variasi tekanan evaporator. Tampak bahwa nilai kritis *entrainment ratio* ( $\omega$ ) yang diperoleh bergantung pada tekanan evaporator (*suction*). Semakin tinggi tekanan evaporator menghasilkan nilai *entrainment ratio* ( $\omega$ ) yang semakin tinggi.

Gambar 10 menampilkan perbandingan garis optimasi *entrainment ratio* ejector untuk ketiga model nosel pada kondisi operasi yang sama. Dari gambar diatas terlihat bahwa nilai *entrainment ratio* terbesar diperoleh pada model *ejector* nosel X.



**Gambar 10.**Perbandingan grafik performansi operasi optimal dari model ejector nosel A, E dan X berdasarkan variasi tekanan evaporator.

**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. Sedangkan untuk variasi kondisi operasi, semakin tinggi temperatur motive maka nilai entrainment ratio semakin kecil, sebaliknya semakin tinggi temperatur suction maka nilai entrainment ratio semakin besar.

### **Ucapan Terima kasih**

Penelitian ini didukung oleh UPPT FT UNDIP

### **Referensi**

Chunnanond K, Aphornratana S. Ejecors: application in refrigeration technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 8, 129-155 (2004)

Huang BJ, Chang JM, Wang CP, Petrenko VA. A 1D analysis of ejector performance. *Int J Refrigeration*. Vol. 22, 354–364 (1999)

Rusly E, Aye L, Charters WWS, Ooi A. CFD analysis of ejector in acombined ejector cooling system. *Int J Refrigeration*. Vol. 28, 1092–1101 (2005)