

EFEKTIFITAS *STEAM EJECTOR* TINGKAT PERTAMA DI PLTP LAHENDONG UNIT 2

Frans Palobo Sappu, Hengky Luntungan
Jurusan Teknik Mesin Universitas Sam Ratulangi, Manado

ABSTRAK

PLTP Lahendong Unit 2 dalam operasinya menggunakan beberapa *steam ejector*, satu diantaranya adalah *steam ejector* tingkat pertama yang merupakan bagian dari sistem ekstraksi gas dengan fungsi utama untuk mengeluarkan *non-condensable gas* (NCG) yang terkumpul pada kondenser utama secara kontinu untuk menjaga kevakuman kondenser.

Penelitian bertujuan mengetahui kemampuan *steam ejector* tingkat pertama mengeluarkan NCG kondisi aktual dari kondenser utama. Simulasi komputasi dinamika fluida digunakan untuk menganalisis karakteristik aliran pada *steam ejector* dengan membandingkan data kondisi aktual dan data desain pabrik dari *steam ejector* tingkat pertama.

Dari simulasi diperoleh nilai efisiensi *steam ejector* kondisi aktual 0,527 dan desain pabrik 0,554 sehingga berakibat penurunan efisiensi 4,87%. Hasil simulasi ini menunjukkan kemampuan *steam ejector* kondisi aktual mengeluarkan NCG dari kondenser utama sebesar 1.402,11 kg/jam dan untuk *steam ejector* desain pabrik sebesar 1.479,34 kg/jam. Kemampuan *steam ejector* kondisi aktual mengalami penurunan sebesar 5,22% dari *steam ejector* kondisi desain pabrik.

Hasil tersebut mengindikasikan bahwa *steam ejector* masih efektif dan dalam keadaan baik.

Kata kunci: *Steam Ejector*, NCG, Efisiensi.

1. Pendahuluan

Peralatan pembangkit listrik tenaga panas bumi dibuat berdasarkan karakteristik uap yang dihasilkan oleh *reservoir* dalam bumi. Salah satu karakteristik uap yang dihasilkan oleh *reservoir* dalam bumi adalah terkandungnya gas-gas yang tidak dapat dikondensasikan (*non-condensable gas*) di dalam uap tersebut (Safarudin dan Prabowo, 2011).

Keberadaan *non-condensable gas* (NCG) dalam uap akan mempengaruhi efisiensi termal turbin ketika NCG terkumpul di dalam kondenser utama. NCG yang terkumpul di dalam kondenser utama akan mengakibatkan tekanan kondensasi semakin besar dan mengakibatkan nilai entalpi uap di kondenser utama naik. Naiknya nilai entalpi uap di kondenser utama akan menurunkan efisiensi termal turbin dan pada akhirnya menurunkan kerja mekanis yang dihasilkan turbin. Untuk mencegah terkumpulnya NCG di kondenser utama dan untuk mempertahankan tingkat kevakuman di kondenser utama, pembangkit listrik tenaga panas bumi dilengkapi dengan sistem ekstraksi gas.

Penelitian dilakukan terhadap sistem ekstraksi gas di PLTP Lahendong Unit 2

dengan fokus penelitian terhadap efektivitas *steam ejector* tingkat pertama. Proses penelitian menggunakan simulasi komputasi dinamika fluida terhadap *steam ejector* tingkat pertama dengan perangkat lunak CFD (*computational fluid dynamic*).

1.2 Perumusan Masalah

Masalah yang diangkat dari penelitian ini adalah bagaimana menentukan efektifitas dari *steam ejector* tingkat pertama pada PLTP Lahendong Unit 2 sebagai bagian dari sistem ekstraksi gas.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis karakteristik aliran pada *steam ejector* tingkat pertama di PLTP Lahendong Unit 2 dengan bantuan perangkat lunak simulasi aliran fluida CFD.

1.4 Batasan Masalah

1. Desain *steam ejector* tingkat pertama sesuai desain pabrik pembuat.
2. Aliran di dalam *steam ejector* tingkat pertama diasumsikan tunak.

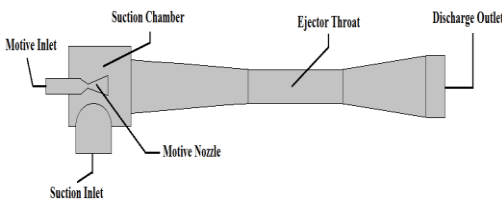
3. Tidak terjadi reaksi kimia antara uap dengan NCG di dalam *steam ejector* tingkat pertama.

2. Landasan Teori

2.1 Steam Ejector

Prinsip kerja dari *steam ejector* adalah mengubah energi tekanan dari uap penggerak menjadi energi kecepatan. Proses perubahan energi tersebut terjadi ketika uap penggerak dialirkan masuk ke *inlet* nosel, selanjutnya uap penggerak dieks-pansikan oleh nosel sehingga terjadi penurunan tekanan dan peningkatan kecepatan. Proses ekspansi ini kemudian menyebabkan tekanan di sekitar mulut *outlet* nosel menjadi rendah. Tekanan di sekitar mulut *outlet* nosel tersebut lebih rendah daripada tekanan gas yang ingin dihisap sehingga menyebabkan gas tersebut terhisap ke dalam *steam ejector* (Lines dan Smith, 1997).

Gambar 2.1 menunjukkan bagian-bagian pada *steam ejector*.



Gambar 2.1 *Steam ejector*

Persamaan untuk menentukan efisiensi *steam ejector* adalah sebagai berikut (Muaya, 2005):

$$\eta = \left[\frac{m_s}{m_m} + 1 \right] \left[\frac{h_o - h_{bc}}{h_i - h_s} \right] \dots (2.1)$$

dimana:

η = efisiensi *steam ejector*

m_s = laju aliran massa fluida terhisap (kg/s)

m_m = laju aliran massa uap penggerak (kg/s)

h_i = entalpi uap penggerak di *inlet motive* (kJ/kg)

h_e = entalpi uap penggerak di *outlet nozzle* (kJ/kg)

h_{bc} = entalpi fluida sebelum dikompresi (kJ/kg)

h_o = entalpi fluida di *outlet steam ejector* (kJ/kg)

Persamaan untuk menentukan *entrainment ratio (E) steam ejector*:

$$E = \frac{m_s}{m_m} \dots (2.2)$$

Beban NCG pada kondenser utama didapat dengan mengalikan persentase NCG yang terkandung pada uap dengan laju aliran massa uap masuk turbin

$$NCG_{mc} = \%NCG \times m_T \dots (2.3)$$

2.2 Aliran Termampatkan

Gas ideal

Untuk aliran termampatkan, hukum gas ideal dapat dinyatakan dengan persamaan berikut (Moran dkk, 2011):

$$\rho = \frac{P}{\frac{R}{M_w} T} \dots (2.4)$$

Bilangan Mach

Bilangan Mach adalah perbandingan kecepatan sesungguhnya terhadap perambatan di mana bunyi akan merambat melalui fluida tersebut. Nilai c dinyatakan sebagai cepat rambat bunyi, Ma sebagai bilangan Mach dan V sebagai kecepatan fluida (Moran dkk, 2011).

$$Ma = \frac{V}{c} \dots (2.5)$$

Sifat stagnasi aliran termampatkan

Dalam menyederhanakan permasalahan yang dihadapi berkaitan dengan aliran termampatkan, diperkenalkan konsep stagnasi isentropik dan sifat-sifatnya. Keadaan stagnasi isentropik adalah keadaan fluida yang akan dicapai ketika fluida tersebut mengalami perlambatan adiabatik *reversible* sampai kecepatan nol. Dari hukum pertama termodinamika untuk proses keadaan tunak, didapatkan persamaan:

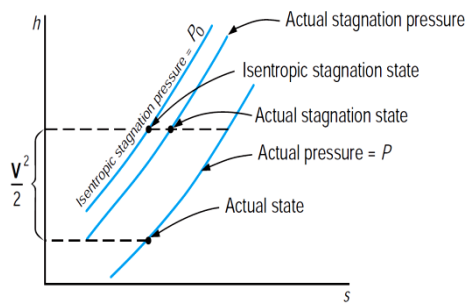
$$h_o = h + \frac{V^2}{2} \dots (2.6)$$

dimana:

h_o = entalpi stagnasi fluida (kJ/kg)

h = entalpi fluida (kJ/kg)

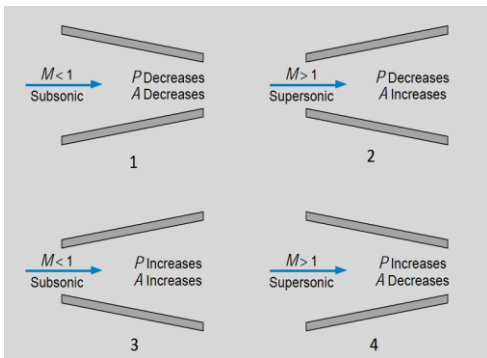
Keadaan stagnasi aktual dan isentropik untuk gas tertentu atau uap digambarkan pada diagram $h-s$. Keadaan stagnasi aktual adalah keadaan yang dicapai setelah perlambatan aktual menuju kecepatan nol, dan mungkin ada *irreversibilities* saat proses perlambatan. Oleh karena itu, syarat sifat stagnasi terkadang mengabaikan sifat aktual pada keadaan aktual.



Gambar 2.2 Ilustrasi keadaan stagnasi pada diagram $h-s$ (Borgnakke dan Sonntag, 2009)

Aliran termampatkan pada nosel

Variasi luas penampang nosel sangat berpengaruh terhadap kecepatan aliran yang melewati nosel. Pada Gambar 2.3, ditunjukkan 4 kasus dari pengaruh variasi luas penampang terhadap kecepatan aliran fluida.



Gambar 2.3 Pengaruh variasi luas area penampang terhadap kecepatan (Borgnakke dan Sonntag 2009)

Dengan menghubungkan persamaan stagnasi aliran termampatkan dengan hubungan termodinamika, maka dapat diperoleh persamaan-persamaan untuk menganalisis aliran termampatkan pada nosel, yaitu (Moran dkk, 2011):

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{(k-1)}{2} Ma^2 \quad \dots(2.7)$$

$$\frac{P_0}{P} = \left[1 + \frac{(k-1)}{2} Ma^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \dots(2.8)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left[1 + \frac{(k-1)}{2} Ma^2 \right]^{\frac{1}{k-1}} \dots(2.9)$$

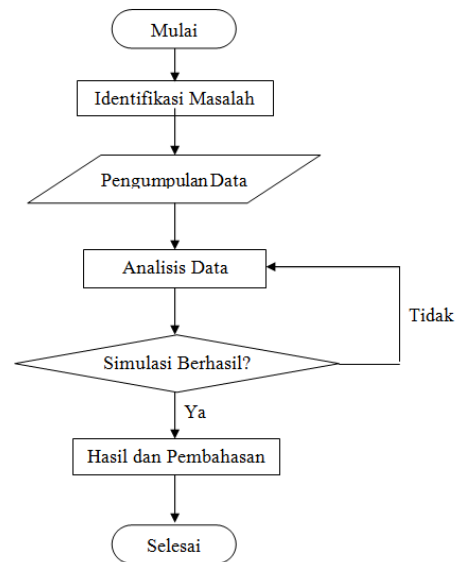
dimana:

- T_0 = temperatur stagnasi fluida (K)
- P_0 = tekanan stagnasi fluida (Pa)
- ρ_0 = berat jenis stagnasi fluida (kg/m^3)

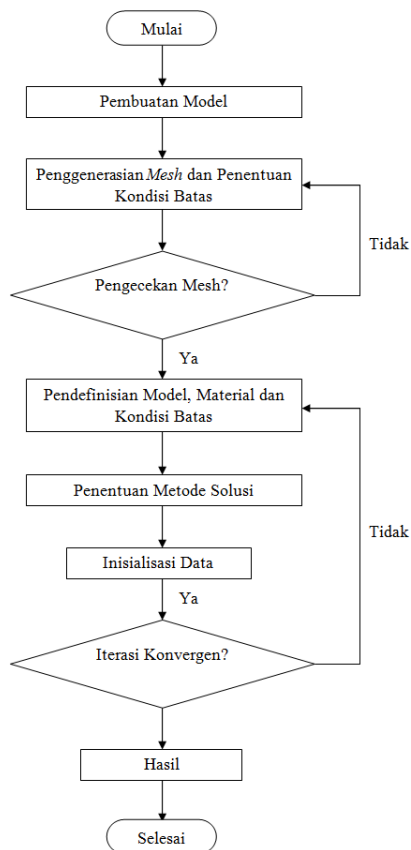
3. Metode Penelitian

Pengambilan data pada PLTP Lahendong Unit 2 meliputi dimensi konstruksi *steam ejector* tingkat pertama, data keadaan fluida pada sisi masuk dan keluar *steam ejector* tingkat pertama dan data desain pabrik.

Sistematika penulisan tergambar sebagaimana diperlihatkan dalam Gambar 3.1 dan prosedur pelaksanaan simulasi pada Gambar 3.2



Gambar 3.1 Prosedur penelitian



Gambar 3.2 Diagram alir simulasi

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Hasil Simulasi Ansys Fluent

Tabel 4.1 Data hasil simulasi Ansys Fluent

		<i>Inlet Motive</i>	<i>Inlet Suction</i>	<i>Outlet</i>
Laju aliran massa	1	2.602,08 kg/h	1.915,2 kg/h	4.510,8 kg/h
	2	2.701,44 kg/h	2.020,68 kg/h	4.720,68 kg/h
Tekanan	1	799.999,9 Pa abs	12.196,97 Pa abs	30003,23 Pa abs
	2	834.859,9 Pa abs	10.952 Pa abs	30597,77 Pa abs
Temperatur	1	444,2 K	323,18 K	406,73 K
	2	445,73 K	322,18 K	405 K
Kecepatan	1	29,84 m/s	22,828 m/s	63,91 m/s
	2	29,77 m/s	26,11 m/s	56,7 m/s
Berat jenis	1	3,902 kg/m ³	0,1512 kg/m ³	0,1979 kg/m ³
	2	4,0598 kg/m ³	0,1377 kg/m ³	0,2028 kg/m ³
Laju aliran massa uap	1	2.602,08 kg/h	411 kg/h	3.013,08 kg/h

	2	2.701,44 kg/h	433,638 kg/h	3.135,08 kg/h
Laju aliran massa NCG	1	-	1.402,11 kg/h	1.402,11 kg/h
	2	-	1.479,34 kg/h	1.479,34 kg/h
Laju aliran massa udara	1	-	102,46 kg/h	102,46 kg/h
	2	-	108,1 kg/h	108,1 kg/h
Kecepatan maksimum	1	1.110,181 m/s		
	2	1.117,688 m/s		

(1: kondisi aktual | 2 : desain pabrik)

1. Entrainment ratio:

$$E = \frac{m_s}{m_m} = \frac{1.915,2 \text{ kg/hr}}{2.602,08 \text{ kg/hr}} = 0,736$$

Nilai *entrainment ratio* kondisi aktual 0,736 dan desain pabrik 0,748. Dari nilai tersebut dapat dilihat terjadi penurunan nilai *entrainment ratio* kondisi aktual sebesar 1,6% dari kondisi desain pabrik.

2. Beban NCG di kondenser utama pada NAB:

- Laju aliran uap masuk turbin: $m_T = 146 \text{ T/hr}$ (146.000 kg/hr)

- Persentase NCG: %NCG= 1%

Dengan menggunakan Persamaan (2.3)

$$NCG_{mc} = \%NCG \times m_T$$

$$NCG_{mc} = 0,01 \times 146.000 \text{ kg/hr}$$

$$NCG_{mc} = 1.460 \text{ kg/hr}$$

3. Perbandingan NCG yang diekstraksi oleh steam ejector kondisi aktual dengan beban NCG di kondenser utama pada NAB:

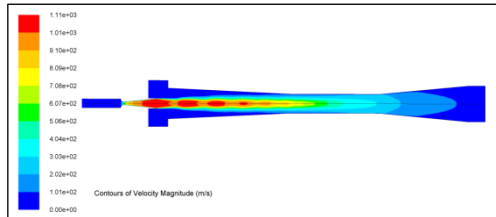
$$\frac{1.402,11 \text{ kg/hr}}{1.460 \text{ kg/hr}} = 0,96$$

Dari hasil perbandingan NCG yang diekstraksi dari kondenser utama oleh *steam ejector* pada kondisi aktual dengan beban NCG di kondenser utama pada NAB, dapat diketahui bahwa *steam ejector* tingkat pertama kondisi aktual dapat mengekstraksi 96% beban NCG pada nilai persentase NCG maksimum atau NAB.

4. Karakteristik aliran pada steam ejector

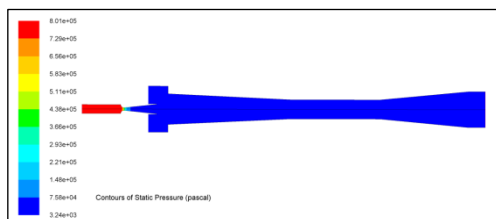
Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 memperlihatkan kontur kecepatan dan kontur tekanan di dalam *steam ejector*. Uap penggerak memasuki *steam ejector* melalui *inlet motive* dengan tekanan 800.000 Pa abs dan temperatur 444,2 K. Uap penggerak kemudian diekspansikan melalui nosel konvergen-divergen sehingga tekanan uap

menjadi turun diikuti dengan naiknya kecepatan. Kecepatan subsonik uap penggerak diubah menjadi supersonik di dalam nosel sehingga menyebabkan turunnya tekanan uap penggerak secara signifikan yang mengakibatkan terjadinya tekanan rendah pada daerah keluaran nosel. Rendahnya tekanan pada keluaran nosel menyebabkan terhisapnya gas NCG, udara dan uap dari kondenser utama masuk ke dalam *steam ejector*.

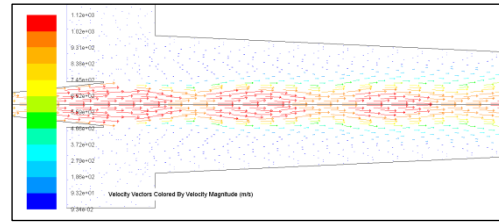


Gambar 4.1 Kontur kecepatan pada kondisi aktual

Uap penggerak dengan kecepatan supersonik kemudian masuk ke bagian konvergen *steam ejector* dimana pada bagian ini uap penggerak mulai bercampur dengan gas NCG, udara, dan uap dari kondenser utama. Pada bagian konvergen ini, tekanan uap penggerak kembali naik diakibatkan berkurangnya luas daerah laluan uap. Uap penggerak dengan kecepatan supersonik kemudian masuk ke bagian leher *steam ejector* dimana pada bagian ini kecepatan uap kembali menjadi subsonik. Setelah melewati leher *steam ejector*, uap kemudian memasuki bagian difuser *steam ejector* dimana tekanan uap kembali naik akibat diperbesarnya luas daerah laluan uap.



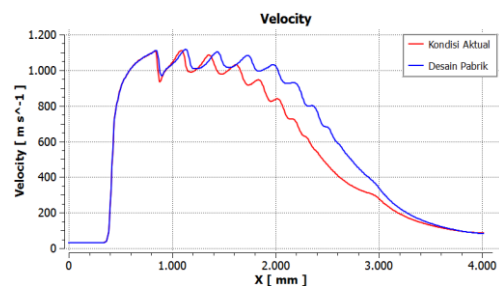
Gambar 4.2 Kontur tekanan pada kondisi aktual



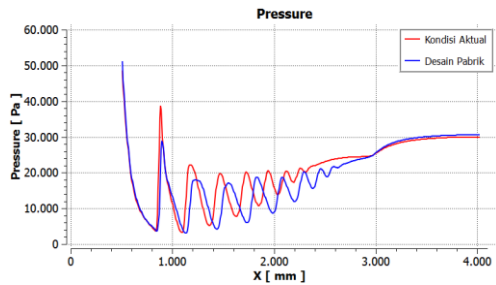
Gambar 4.3 Vektor kecepatan di keluaran nosel pada kondisi aktual

Pada Gambar 4.3 dapat dilihat proses mengalirnya gas NCG, udara, dan uap dari kondenser utama ke dalam *steam ejector*. Uap penggerak dengan kecepatan supersonik yang keluar dari nosel dikompresi oleh gas NCG, udara dan uap dari kondenser utama karena tekanan yang dimiliki lebih besar dari tekanan uap penggerak di daerah keluaran nosel. Proses kompresi ini menyebabkan inti semburan uap penggerak pada keluaran nosel tidak berkembang sempurna dan menyebabkan kecepatan supersonik uap penggerak pada keluaran nosel dan bagian konvergen *steam ejector* berfluktuasi.

Pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 ditunjukkan grafik kecepatan dan grafik tekanan *steam ejector* kondisi aktual dan desain pabrik. Dari grafik kecepatan dapat dilihat bahwa desain pabrik dengan tekanan 835.000 Pa abs dapat mempertahankan kecepatan saat memasuki daerah konvergen dan leher dari *steam ejector* sebelum terjadi *normal shock* yang mengakibatkan terjadinya penurunan kecepatan secara signifikan. Kecepatan desain pabrik dapat bertahan lebih dari kondisi aktual karena momentum yang dimiliki desain pabrik di daerah konvergen dan leher *steam ejector* lebih besar dari yang dimiliki kondisi aktual.



Gambar 4.4 Grafik kecepatan



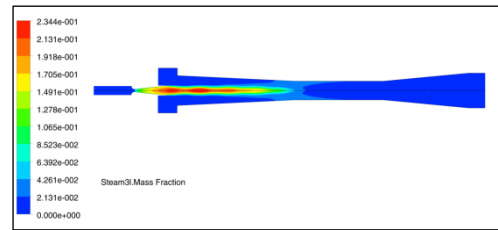
Grafik 4.5 Grafik tekanan

Gambar 4.5 menunjukkan penurunan tekanan yang besar dari uap penggerak pada saat uap penggerak melewati nosel konvergen-divergen sehingga terjadi tekanan rendah pada daerah keluaran nosel yang menyebabkan mengalirnya gas NCG, udara dan uap dari kondenser utama. Pada grafik tekanan dapat juga dilihat dengan jelas akibat dari kompresi gas NCG, udara, dan uap terhadap uap penggerak sehingga terjadinya fluktuasi tekanan dan kecepatan. Untuk tekanan outlet, desain pabrik memiliki tekanan yang lebih besar dari kondisi aktual disebabkan *normal shock* desain pabrik yang terjadi lebih lambat daripada *normal shock* kondisi aktual.

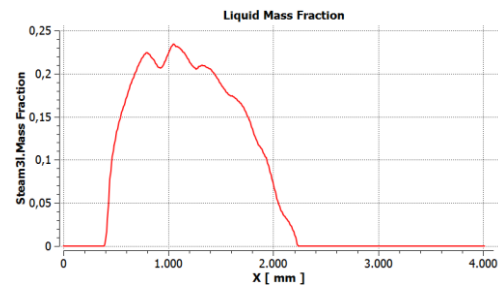
4.2 Hasil Simulasi Ansys CFX Kondensasi uap penggerak

Untuk mengetahui proses kondensasi uap penggerak pada *steam ejector*, maka dilakukan simulasi multifasa. Simulasi aliran multifasa dimaksudkan untuk memodelkan proses kondensasi uap pada *steam ejector* dimana pemodelan ini tidak dapat dilakukan pada simulasi sebelumnya karena pada simulasi sebelumnya digunakan persamaan keadaan gas ideal. Pada simulasi ini sifat-sifat uap menggunakan data IAPWS IF 97, dengan asumsi fluida yang masuk dari kondenser utama adalah uap air.

Gambar 4.9 menunjukkan proses terjadinya kondensasi uap penggerak, dimana proses kondensasi terjadi pada saat uap penggerak berekspansi melalui nosel konvergen divergen pada *steam ejector*. Pada saat uap penggerak berekspansi ke kecepatan supersonik, maka bersamaan dengan itu tekanan dan temperatur uap penggerak turun sampai di bawah keadaan saturasi sehingga uap mulai terkondensasi. Uap yang terkondensasi kemudian kembali menguap pada saat uap penggerak mulai memasuki leher *steam ejector*, dimana pada bagian ini tekanan dan temperatur uap penggerak kembali naik melewati keadaan saturasi.



Gambar 4.9 Kontur fraksi massa cairan pada kondisi aktual



Gambar 4.10 Grafik fraksi massa cairan pada kondisi aktual

Efisiensi *steam ejector*

Tabel 4.2 menunjukkan hasil simulasi multifasa *steam ejector* tingkat pertama untuk perhitungan efisiensi dengan asumsi fluida dari kondenser utama adalah uap. Entalpi uap sebelum dikompresi didapat dengan menganalisa perubahan gradient tekanan pada dinding leher *steam ejector*, dimana posisi naiknya tekanan secara signifikan digunakan sebagai posisi untuk menentukan entalpi uap.

Tabel 4.2 Data untuk perhitungan efisiensi *steam ejector*

	Kondisi Aktual	Desain Pabrik
Laju aliran massa uap penggerak	0,72 kg/s	0,7504 kJ/kg
Laju aliran massa uap terhisap	0,5224 kg/s	0,532 kJ/kg
Entalpi uap penggerak di <i>inlet motive</i>	2.770,18 kJ/kg	2.771,2 kJ/kg
Entalpi uap penggerak di <i>outlet nozzle</i>	2.175,15 kJ/kg	2.171,43 kJ/kg
Entalpi uap sebelum dikompresi	2.489,7 kJ/kg	2.494,04 kJ/kg
Entalpi uap di <i>outlet</i>	2.675,74 kJ/kg	2.682,51 kJ/kg

Dengan menggunakan Persamaan 2.2, maka nilai efisiensi *steam ejector* dapat diperoleh:

$$\eta = \left[\frac{m_s}{m_m} + 1 \right] \left[\frac{h_o - h_{bc}}{h_i - h_e} \right]$$

$$\eta = \left[\frac{0,5224 \text{ kg/s}}{0,72 \text{ kg/s}} + 1 \right] \times \left[\frac{2.675,74 \text{ kJ/kg} - 2.489,7 \text{ kJ/kg}}{2.770,18 \text{ kJ/kg} - 2.171,43 \text{ kJ/kg}} \right]$$

$$\eta = 0,527$$

Dengan menggunakan persamaan di atas, maka didapat nilai efisiensi *steam ejector* desain pabrik 0,554. Dari hasil di atas dapat dilihat terjadinya penurunan efisiensi *steam ejector* kondisi aktual sebesar 4,87% dari *steam ejector* desain pabrik.

5. Penutup

Kesimpulan

Dari hasil simulasi pemodelan aliran fluida terhadap *steam ejector* tingkat pertama di PLTP Lahendong Unit 2 dengan menggunakan Ansys Fluent dan Ansys CFX, maka dapat disimpulkan:

1. Nilai *entrainment ratio steam ejector* kondisi aktual 0,736 dan desain pabrik 0,748. Terjadi penurunan nilai *entrainment ratio* kondisi aktual sebesar 1,6% dari kondisi desain pabrik.
2. Efisiensi *steam ejector* kondisi aktual 0,527 dan desain pabrik 0,554. Terjadi penurunan efisiensi sebesar 4,87%
3. NCG yang dapat diekstraksi *steam ejector* dari kondenser utama pada kondisi aktual 1.402,11 kg/hr dan desain pabrik 1.479,34 kg/hr. Terjadi penurunan sebesar 5,22%.
4. *Steam ejector* kondisi aktual dapat mengekstrak 96% beban NCG di kondenser utama pada nilai persentase NCG maksimum atau NAB sehingga dapat disimpulkan efektif.

Daftar Pustaka

- Borgnakke, C. dan Sonntag, R. E. 2009. *Fundamentals of Thermodynamics*. Edisi 7. John Wiley & Sons.
- Lines, J. R. dan Smith, R. 1997. *Ejector System Troubleshooting*. <http://www.grahammfg.com/usr/pdf/techlibvacuum/216.pdf> 20 Mei 2014
- Moran, M. J. Shapiro, H. N. Boettner, D. D. dan Bailey, M. B. 2011. *Fundamentals of Engineering Thermodynamic*. Edisi 7. John Wiley & Sons.
- Muaya, G. 2005. Analisis Termal dari Extraction Ejector Dua Tingkat pada Sistem Tenaga Uap di PLTP Lahendong

- Sulawesi Utara. Tugas Sarjana. Teknik Mesin Unsrat.
- Potter, M. C. dan Somerton, C. W. 1993. *Thermodynamics of Engineers*, Schaum's Outline Series McGraw-Hill.
- Safarudin, D. 2011. Simulasi CFD Pada Variasi Tekanan Inlet Nozzle Ejector Terhadap Tingkat Ke-vacuum-an Steam Ejector di Unit Pembangkitan Listrik Tenaga Panas Bumi. Tesis. Teknik Mesin ITS.