



Analisis Eksergi Pada *Boiler* & Turbin Uap Pembangkit Listrik Tenaga Uap *Subcritical* 315 MW

Feriyanto Mandila Pallea^{1*}, Belyamin¹, dan Paulus Sukusno¹

¹ Program Studi Pembangkit Tenaga Listrik, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. Dr. G.A Siwabessy, Kampus Baru UI Depok 16425

Abstrak

Makalah ini bertujuan untuk menentukan irreversibilitas dan efisiensi eksergi pada boiler dan turbin uap pembangkit listrik tenaga uap Rembang. Analisis eksergi merupakan alat untuk melengkapi analisis energi sehingga dapat memberikan pemahaman yang lebih mengenai desain, evaluasi, dan penentuan kondisi kerja komponen pada pembangkit serta menunjukkan kerugian akibat irreversibilitas yang terjadi. Hasil analisis eksergi pada boiler adalah irreversibilitas yang terjadi saat commissioning dan bulan Maret 2019 secara berurutan adalah 434,41 MW dan 562,87 MW. Sedangkan untuk turbin uap saat commissioning dan Maret 2019 adalah 20 MW dan 44,93 MW.

Kata-kata kunci: Analisis eksergi; Irreversibilitas; Efisiensi eksergi

Abstract

This paper aims to determine the exergy efficiency and efficiency of the Rembang steam powerplant boiler and steam turbine. Exergy analysis is a tool to complement energy analysis so that it can provide more understanding of the design, evaluation, and determination of the working conditions of the components at the plant and shows the losses due to irreversibility that occur. The results of exergy analysis on boilers are irreversibility that occurs during commissioning and in March 2019 respectively are 434.41 MW and 562.87 MW. Whereas for steam turbines when commissioning and March 2019 are 20 MW and 44.93 MW.

Keywords: Exergy analysis; Irreversibility; Exergy efficiency

1. PENDAHULUAN

PT PJB UBJOM PLTU (Pembangkitan Jawa Bali Unit Bisnis Jasa *Operation & Maintenance* Pembangkit Listrik Tenaga Uap) Rembang merupakan unit pembangkitan dengan kapasitas 2×315 MW. Pembangkit listrik tenaga uap Rembang telah beroperasi sejak tahun 2011. Dengan waktu pengoperasian yang sudah cukup lama, maka diperlukan kajian untuk mengetahui kondisi dari setiap komponen pembangkit listrik tenaga uap Rembang untuk mengetahui komponen-komponen apa yang telah mengalami penurunan kinerja. Analisis umum yang dilakukan untuk mengetahui kondisi dari suatu unit pembangkitan adalah dengan menggunakan analisis energi. Namun untuk melengkapi hasil dari analisis energi dapat dilakukan analisis eksergi. Hal ini dikarenakan analisis eksergi didasari oleh hukum kedua termodinamika. Melalui hukum kedua termodinamika ini dapat diberikan pemahaman yang lebih baik mengenai desain, evaluasi, dan penentuan kondisi kerja pembangkit serta menunjukkan kerugian akibat irreversibilitas dalam situasi nyata.

Dalam penelitian ini, komponen yang akan dikaji adalah turbin uap dan *boiler*. Hal ini dikarenakan turbin uap dan *boiler* merupakan komponen yang memegang peranan penting dalam operasi pembangkit listrik tenaga uap Rembang. Hasil Riyan et al menyatakan bahwa *boiler* dan turbin uap mengalami kehancuran eksergi terbesar [1]. Hasil Muhammad Fauzi Zakaria et al didapati bahwa efisiensi eksergi pada turbin uap pembangkit

* Corresponding author *E-mail address*: palleaf@gmail.com

listrik tenaga uap Tanjung Awar-Awar adalah sebesar 94,08 dengan laju kerusakan eksergi rata-rata pada turbin uap sebesar 25,98 MW [2].

Tujuan dari penulisan makalah ini adalah untuk menentukan besar ireversibilitas dan efisiensi eksergi di boiler dan turbin uap.

2. STUDI PUSTAKA

Eksergi

Eksergi merupakan energi yang dapat dimanfaatkan (*available energy*) atau ukuran ketersediaan energi untuk melakukan kerja. Eksergi suatu sumber daya memberikan indikasi seberapa besar kerja yang dapat dilakukan oleh sumber daya tersebut pada suatu lingkungan tertentu. Konsep eksergi secara eksplisit memperlihatkan kegunaan (kualitas) suatu energi dan zat sebagai tambahan selain apa yang dikonsumsi dalam tahapan-tahapan pengkonversian atau perpindahan energi. Salah satu kegunaan utama dari konsep eksergi adalah keseimbangan eksergi dalam analisis sistem termal. Kesenjangan eksergi (analisis eksergi) dapat dipandang sebagai pernyataan hukum energi degradasi. Analisis eksergi adalah alat untuk identifikasi jenis, lokasi dan besarnya kerugian termal. Identifikasi dan kualifikasi kerugian ini memungkinkan untuk evaluasi dan perbaikan desain sistem termal. [3]

Analisis Eksergi

Untuk melakukan analisis eksergi terhadap aliran, energi kinetik dan potensial diabaikan. Persamaan eksergi untuk aliran sebagai berikut [4]

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (1)$$

Eksergi kimia merupakan eksergi yang berhubungan dengan perubahan senyawa kimia. Persamaan eksergi kimia sebagai berikut [1]

$$E^{CH} = m \times e^{CH} \quad (2)$$

Untuk nilai e^{CH} pada uap dan air secara berturut-turut adalah 526,33 kJ/kg dan 49,12 kJ/kg. Nilai eksergi kimia untuk bahan bakar diperoleh melalui persamaan [3]

$$E_{fuel}^{CH} = \beta \times LHV \quad (3)$$

Nilai rasio eksergi bahan bakar hidrokarbon β dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut [1]

$$\beta = 1,0437 + 0,1882\left(\frac{H}{C}\right) + 0,0610\left(\frac{O}{C}\right) + 0,0404\left(\frac{N}{C}\right) \quad (4)$$

3. METODE

Pengumpulan Data dan Penentuan Batasan Masalah

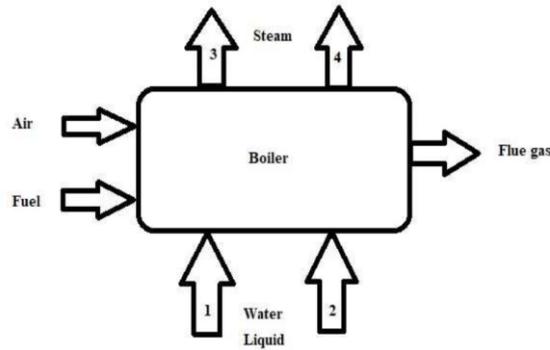
Dalam penelitian ini data primer yang digunakan adalah data operasional boiler dan turbin uap selama bulan Maret 2019 dan spesifikasi batubara yang digunakan pembangkit listrik tenaga uap Rembang. Data operasional tersebut berisikan laju aliran massa, tekanan, dan temperatur. Lalu diperlukan kondisi temperatur dan tekanan lingkungan sebagai data pendukung saat mengolah data.

Pengolahan Data

Pengolahan data diawali dengan mencari data properti termodinamika menggunakan perangkat lunak *Engineering Equation Solver* berdasarkan tekanan dan temperatur aliran masuk dan keluar pada boiler dan turbin uap. Hasil yang diperoleh dari perangkat lunak *Engineering Equation Solver* akan dibuatkan Tabel keseimbangan energi. Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk menentukan laju massa setiap ekstraksi turbin uap dengan kesetimbangan energi dan massa pada pemanas air umpan (*feedwater heater*).

Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan menggunakan persamaan matematis untuk menentukan eksergi hancur dan efisiensi eksergi. Untuk membantu proses perhitungan eksergi dibuat diagram boiler diberikan oleh Gambar 1.



Gambar 1. Diagram skematik boiler

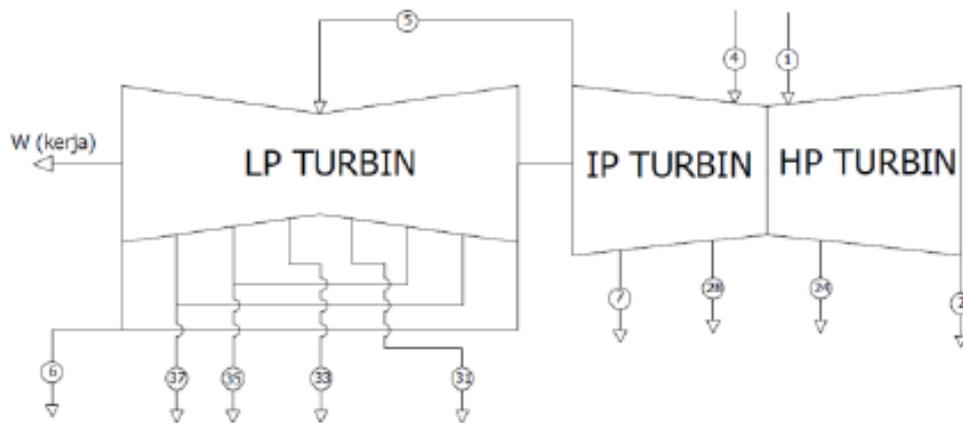
Persamaan eksgergi untuk menentukan eksgergi hancur pada boiler merujuk pada makalah [4]

$$E_d = E_{fuel} - ((E_3 - E_1) + (E_4 - E_2)) \quad (5)$$

Untuk menentukan efisiensi eksgergi boiler menggunakan persamaan [4]

$$\eta_{exb} = \frac{(E_3 - E_1) + (E_4 - E_2)}{E_{fuel}} \quad (6)$$

Lalu untuk analisis pada turbin uap dilakukan analisis eksgergi pada tiap tingkatan turbin yaitu turbin HP, IP, dan LP. Diagram skematik untuk turbin uap diberikan oleh Gambar 2.



Gambar 2. Diagram skematik turbin uap

Persamaan untuk ireversibilitas pada tiap tingkatan turbin sebagai berikut :

1. High pressure turbine

$$E_{d,HP} = Ex_1 - (Ex_2 + Ex_{24}) - \dot{W}_{HP} \quad (7)$$

2. Intermediate pressure turbine

$$E_{d,IP} = Ex_4 - (Ex_7 + Ex_{28} + Ex_5) - \dot{W}_{IP} \quad (8)$$

3. Low pressure turbine

$$E_{d,LP} = Ex_5 - (Ex_6 + Ex_{37} + Ex_{35} + Ex_{33} + Ex_{31}) - \dot{W}_{LP} \quad (9)$$

Untuk menentukan efisiensi eksergi turbin uap tiap tingkatan menggunakan persamaan sebagai berikut :

1. *High pressure turbine*

$$\eta_{x.HPT} = \frac{\dot{W}_{HP}}{Ex_1 - (Ex_2 + Ex_{24})} \times 100\% \quad (10)$$

2. *Intermediate pressure turbine*

$$\eta_{x.IPT} = \frac{\dot{W}_{IP}}{Ex_4 - (Ex_7 + Ex_{28} + Ex_5)} \times 100\% \quad (11)$$

3. *Low pressure turbine*

$$\eta_{x.LPT} = \frac{\dot{W}_{LP}}{Ex_5 - (Ex_6 + Ex_{37} + Ex_{35} + Ex_{33} + Ex_{31})} \times 100\% \quad (12)$$

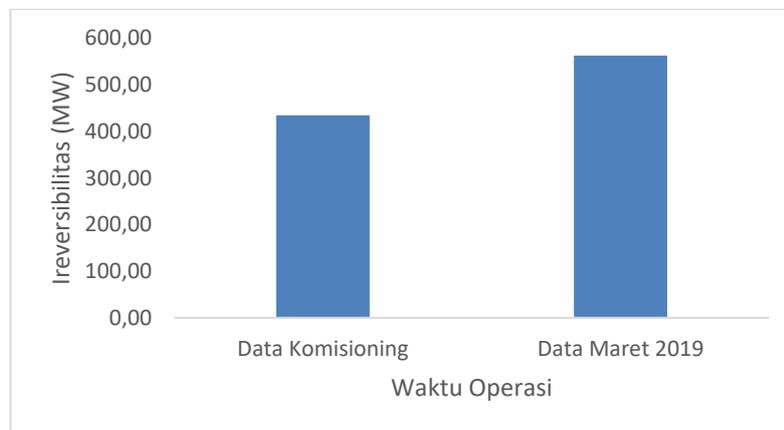
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisis Eksergi Boiler

Tabel 1 merupakan analisis eksergi terhadap boiler. Eksergi batubara merupakan kandungan energi maksimum dari batubara. Eksergi batubara dipengaruhi oleh nilai *lower heating value* batubara. Saat *commissioning* LHV batubara yang digunakan adalah 4977,07 kcal/kg. Sedangkan pada bulan Maret 2019, LHV batubara yang digunakan adalah 4504 kcal/kg. Tabel 1 menunjukkan bahwa nilai eksergi pada boiler terbesar terdapat pada *fuel* dikarenakan *fuel* memiliki eksergi kimia yang besar.

Tabel 1. Ireversibilitas dan efisiensi eksergi pada boiler

Komponen	Eksergi Batubara (MW)		Ireversibilitas (MW)		Efisiensi eksergi (%)	
	<i>Commissioning</i>	Maret 2019	<i>Commissioning</i>	Maret 2019	<i>Commissioning</i>	Maret 2019
<i>Boiler</i>	840,32	952,13	434,41	562,87	48,30	40,88



Gambar 3. Diagram ireversibilitas boiler

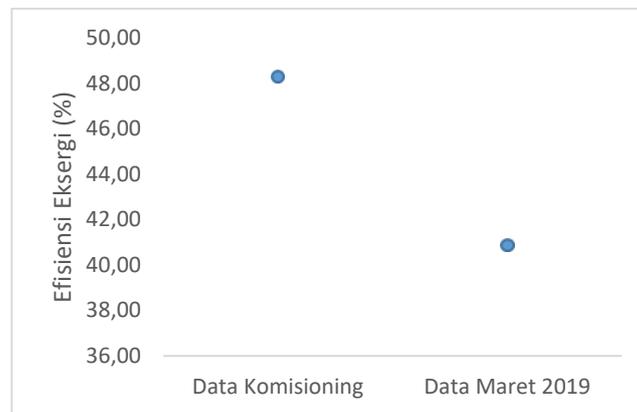
Gambar 3 menunjukkan ireversibilitas pada boiler. Terlihat bahwa terjadi kenaikan ireversibilitas pada boiler. Saat *commissioning* ireversibilitas pada boiler adalah 434,41 MW dan saat bulan Maret 2019 adalah 562,87. Kenaikan ireversibilitas ini terjadi dikarenakan bertambahnya laju aliran batubara pada boiler. Saat *commissioning* laju aliran batubara adalah 37,73 kg/s sedangkan saat bulan Maret 2019 adalah 47,14 kg/s. Sehingga dapat diketahui bahwa laju aliran massa baik batubara maupun uap mempengaruhi ireversibilitas pada boiler. Dalam kasus ini, terlihat bahwa boiler pada bulan Maret 2019 belum bisa memanfaatkan energi dari batubara secara maksimal. Sedangkan perubahan tekanan dan temperatur tidak memberikan perubahan yang signifikan. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 2 dan 3.

Tabel 2. Data operasi dan eksergi setiap aliran pada boiler saat commissioning

Nomor Aliran	Fasa Aliran	\dot{m} (kg/s)	P (bar)	T (K)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)	E (kW)	E (MW)
1	Air	296,95	184,83	550,11	1216	3,002	92872,78	92,87
2	Uap	296,95	163,6	807,2	3389	6,412	431327,48	431,33
3	Uap	246,6	38,07	599,9	3038	6,513	264089,51	264,09
4	Uap	246,6	35,21	812,3	3540	7,267	331543,98	331,54

Tabel 3. Data operasi dan eksergi setiap aliran pada boiler saat bulan Maret 2019

Nomor Aliran	Fasa Aliran	\dot{m} (kg/s)	P (bar)	T (K)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)	E (kW)	E (MW)
1	Air	286,2	174,2	549,6	1214	3	89111,69	89,11169
2	Uap	286,2	155,1	811	3410	6,459	417647,25	417,64725
3	Uap	239,2	38,33	608,8	3060	6,547	258962,85	258,96285
4	Uap	239,2	35,5	806,6	3526	7,247	319695,73	319,69573



Gambar 4. Diagram efisiensi eksergi boiler

Gambar 4 menunjukkan bahwa efisiensi eksergi mengalami penurunan dengan bertambahnya irreversibilitas yang terjadi pada boiler. Penyebab irreversibilitas ini terjadi disebabkan oleh tiga jenis irreversibilitas yaitu pada reaksi pembakaran, perpindahan kalor dan gesekan. Ketiga jenis irreversibilitas ini terjadi pada ruang bakar, dimana reaksi kimia merupakan sumber irreversibilitas yang sangat signifikan dan berhubungan dengan perpindahan kalor. Proses pembakaran pada boiler merupakan sumber irreversibilitas yang sangat signifikan [5].

Hasil Analisis Eksergi Turbin Uap

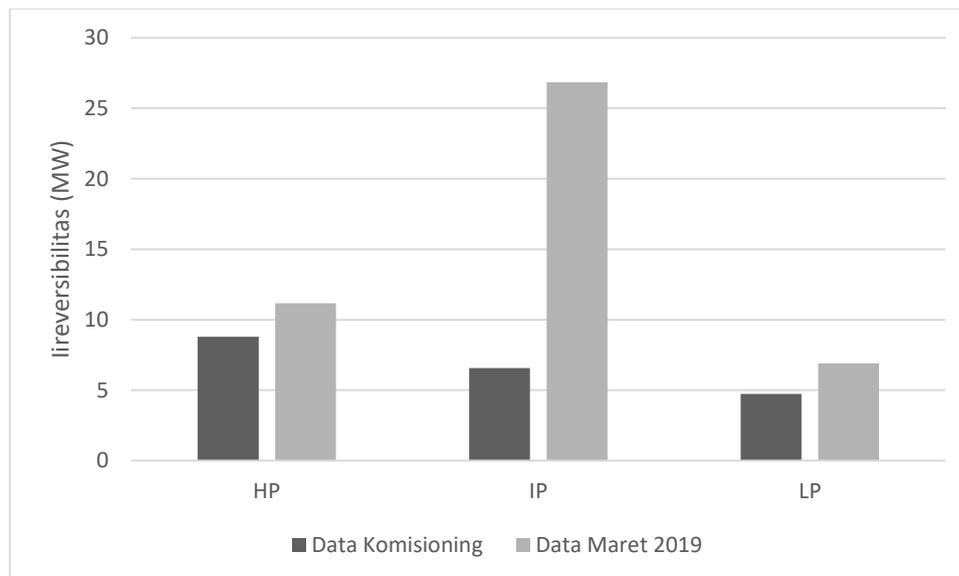
Dalam penelitian ini, analisa eksergi dilakukan terhadap setiap tingkatan turbin uap yaitu *high pressure turbine*, *intermediate pressure turbine*, dan *low pressure turbine*. Hasil perhitungan analisa eksergi turbin uap diberikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Kerja aktual, kerja maksimum, ireversibilitas, efisiensi eksergi turbin uap

Parameter	Satuan	Data <i>Commissioning</i>	Data Maret 2019
W_{HP}	MW	104,487	100,171
W_{IP}	MW	89,33	95,42
W_{LP}	MW	116,6	99,05
$W_{Rev,HP}$	MW	113,267	111,331
$W_{Rev,IP}$	MW	95,9	122,27
$W_{Rev,LP}$	MW	121,33	105,97
I_{HP}	MW	8,78	11,16
I_{IP}	MW	6,57	26,85
I_{LP}	MW	4,73	6,92
η_{HP}	%	92,25	89,98
η_{IP}	%	93,15	78,04
η_{LP}	%	96,1	93,47
W_{Total}	MW	310,42	294,641
$W_{Rev,Total}$	MW	330,497	339,571
I_{Total}	MW	20,077	44,93
η_{Total}	%	93,93	87

Tabel 2 merupakan analisis eksergi pada turbin uap. Analisis eksergi menunjukkan ireversibilitas, kerja potensial, dan efisiensi eksergi pada turbin uap. Hasil analisis eksergi menunjukkan bahwa terjadi penurunan efisiensi eksergi pada turbin uap. Hal ini disebabkan pembebanan yang dilakukan saat *commissioning* dan bulan Maret 2019 mengalami penurunan beban. Hal ini dapat dilihat dari kerja aktual pada turbin uap, dimana saat *commissioning* kerja aktual sebesar 310,42 MW dan untuk bulan Maret 2019 kerja aktual yang dihasilkan pada turbin uap adalah 294,64 MW. Efisiensi eksergi saat *commissioning* adalah 93,93%. Artinya bahwa 6,07% kerja yang seharusnya dapat dimanfaatkan terbuang menuju lingkungan. Hal yang sama terjadi pada turbin uap saat bulan Maret 2019 dimana efisiensi eksergi pada turbin uap adalah 87%. Artinya bahwa terjadi peningkatan energi yang terbuang ke lingkungan meningkat dari 6,07% menjadi 13%. Energi yang terbuang ke lingkungan (ireversibilitas) pada turbin uap disebabkan oleh gesekan yang terjadi ketika uap melewati setiap sudu-sudu turbin uap. Gesekan yang terjadi menyebabkan temperatur uap mengalami kenaikan dan meningkatkan entropi [5].

Hasil yang berbeda didapatkan pada penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Fauzi Zakaria dan Mohamad Effendy pada turbin uap pembangkit listrik tenaga uap Tanjung Awar-Awar. Hasil yang didapat adalah turbin tekanan rendah (low pressure turbine) memiliki efisiensi eksergi terendah, dimana efisiensi eksergi turbin tekanan rendah pada pembangkit listrik tenaga uap Tanjung Awar-Awar adalah 90,79% [2]



Gambar 6. Diagram ireversibilitas pada setiap tingkatan turbin uap

Selanjutnya dilakukan analisis eksergi pada setiap tingkatan turbin uap untuk mengetahui dimana ireversibilitas terbesar yang terjadi pada turbin uap. Gambar 6 menunjukkan bahwa saat *commissioning* ireversibilitas terbesar terjadi pada turbin tekanan tinggi (*high pressure turbine*) yaitu sebesar 8,78 MW. Sedangkan saat bulan Maret 2019, ireversibilitas terbesar terjadi pada bagian turbin tekanan menengah (*intermediate pressure turbine*) yaitu sebesar 26,85 MW. Artinya bahwa uap yang masuk menuju turbin IP tidak dikonversikan dengan optimal. Selain itu dengan tingginya ireversibilitas yang terjadi maka terjadi kebangkitan entropi yang besar pada turbin IP. Hal ini menyebabkan kenaikan temperatur uap keluaran turbin IP lebih tinggi dibandingkan ketika tidak terjadi gesekan.

5. KESIMPULAN

Dari hasil analisis eksergi pada *boiler* dan turbin uap pembangkit listrik tenaga uap Rembang, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Ireversibilitas yang terjadi pada *boiler* saat *commissioning* dan bulan Maret 2019, secara berurutan, adalah 434,41 MW dan 562,87 MW. Sedangkan efisiensi eksergi pada *boiler* saat *commissioning* dan bulan Maret 2019 adalah 48,30% dan 40,88%.
2. Ireversibilitas yang terjadi pada turbin uap saat *commissioning* dan bulan Maret 2019 adalah 20 MW dan 44,93 MW. Saat *commissioning* turbin tekanan tinggi memiliki ireversibilitas terbesar yaitu 11,16 MW. Sedangkan saat bulan Maret 2019, turbin tekanan menengah (*intermediate pressure turbine*) memiliki ireversibilitis tertinggi yaitu 26,85 MW.

REFERENSI

1. Y. M. S. Riyan Phanama & Muhammad Ivanto, *Analisis Eksergi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Di PT. Indonesia Power Unit Jasa Pembangunan Sanggau*, Jurnal Teknik Mesin Mahasiswa UNTAN, vol. 1 (2018)
2. M. E. Muhammad Fauzi Zakaria, *Analisis Energi dan Eksergi Turbin Uap Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap Unit 2 Tanjung Awar-Awar*, Jurnal Teknik Mesin Mahasiswa UNESA, vol. 6 (2018)
3. Y. A. Cengel, *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill, New York (2006)
4. G. T. Adrian Bejan & Michael Moran, Ed., *Thermal Design & Optimization*. John Wiley & Sons, New York (1995)
5. M.M.El-Wakil, *Instalasi Pembangkit Daya*. Penerbit Erlangga, Jakarta (1992)