

# ANALISIS *EXERGY* PADA *COMBUSTION CHAMBER* PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS UAP (PLTGU) TELUK LEMBU 30 MW

Windy Lusnia Samosir<sup>[1]</sup> dan Awaludin Martin<sup>[2]</sup>

Laboratorium Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Riau

<sup>[1]</sup> Windy.lusia.tn@gmail.com <sup>[2]</sup> awaludinmartin01@gmail.com

## Abstract

*Combustion chamber is one of the main components in the Combined Cycle Power plant (CCPP) that serves as a supplier of heat energy. Then by the system, the thermal energy will be converted into other forms. Combustion chamber is a major cause of irreversibility in the system. Usually, the performance of a component is evaluated by using the first law of thermodynamics (conservation of energy). However, the first law of thermodynamics only assess the quantity of energy consumption. Therefore, exergy analysis is used (based on the second law of thermodynamics is about the entropy changes) which can be studied more deeply about the quality of an energy (energy available; exergy). The aim of this study is to analyze exergy destruction of combustion chamber on Combined Cycle Power Plant (CCPP) 30 MW Teluk Lembu. Exergy analysis on combustion chamber resulting the exergy destruction is 36.46 MW and exergy efficiency is 63.29%.*

**Keywords:** combustion chamber, analysis of exergy, exergy destruction, efficiency exergetic

## 1. Pendahuluan

Krisis energi belakangan menjadi wacana di berbagai media. Salah satu jenis krisis energi yang terjadi adalah krisis energi listrik. Menurut data statistik konsumsi listrik yang dipenuhi PLN menurut sektor pada tahun 1995-2007 yang dikeluarkan Perusahaan Listrik Negara (PLN) di Indonesia tampak terjadi peningkatan kebutuhan konsumsi listrik yang signifikan tiap tahunnya [1].



Gambar 1 Data Energi Primer di Indonesia [2]

Peningkatan kebutuhan listrik dikemudian hari diperkirakan dapat tumbuh rata-rata 6,5% pertahun hingga tahun 2020. Konsumsi listrik di Indonesia yang begitu besar akan menjadi suatu masalah apabila

penyediaan listrik tidak sejalan dengan kebutuhan. Sementara, ketergantungan Indonesia terhadap energi berbasis bahan bakar fosil masih sangat tinggi. Minyak bumi memakan porsi 39%, batu bara 33% dan gas bumi 19% dari total bauran energi primer (*primary energy mix*) di Indonesia, dan diprediksi masih akan terus dominan hingga 20 tahun mendatang [2].

Di Indonesia, terdapat banyak pembangkit yang menggunakan sumber bahan bakar fosil, seperti pembangkit listrik tenaga gas (PLTG), pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) ataupun gabungan keduanya pembangkit listrik tenaga gas dan uap (PLTGU). Namun efisiensi termal dari PLTGU hanya berkisar pada 40 - 60%, jauh dari kata optimal. Sehingga diperlukan pemanfaatan yang lebih efisien.

Telah banyak usaha yang dilakukan untuk pengefisienan penggunaan energi pada pembangkit listrik. Salah satunya dengan melakukan analisis *exergy*. Selama ini analisis yang dilakukan hanya berdasarkan kepada hukum pertama *thermodynamika*, yaitu energi tidak dapat

diciptakan dan dimusnahkan yang mana penurunan kualitas energi tidak diperhitungkan. Maka untuk mengkaji lebih dalam mengenai penurunan kualitas dari energi tersebut digunakanlah analisis *exergy*. Analisis *exergy* menggunakan konservasi massa dan energi serta berdasar pada hukum *thermodinamika* kedua, dimana proses *thermodinamika* selalu tidak ideal sehingga terjadi penurunan kualitas energi [3].

Analisis *exergy* merupakan sebuah langkah awal dalam upaya pengoptimalan sistem [4]. Dari analisis ini dapat ditentukan lokasi sumber masalah terbesar dalam sistem, dan kemudian dapat diteliti lebih lanjut sebagai upaya pengoptimalan sistem.

Dikarenakan beberapa alasan itulah, pada tahun belakangan ini analisis *exergy* banyak menarik perhatian para ilmuwan dan perancang sistem. Istilah *exergy* pertama kali diperkenalkan oleh Rant pada tahun 1956, *exergy* berasal dari kata *ex* (yang berarti “dari”) dan *ergon* (yang berarti “work/ kerja”) [5]. *Exergy* dari sistem termodinamika adalah kerja maksimum teoritis yang digunakan yang terjadi pada sistem, yang mana mengacu pada kesetimbangan termodinamika antara sistem dengan lingkungan dan hanya ketika terjadi interaksi antara sistem dan lingkungan [6]. *Exergy* [7] dapat didefinisikan juga sebagai potensi penggunaan kerja (*work*) dalam bentuk materi. Potensi kerja yang dapat digunakan ini diperoleh melalui proses reversible. *Exergy* dapat ditransfer di antara sistem dan dapat dihancurkan oleh irreversibilitas dalam sistem.

Analisis *exergy* mempunyai kelebihan bila dibandingkan dengan analisis energi, yang mana diantaranya adalah sebagai berikut [8] :

1. Lebih akurat dalam membuat desain yang optimal, baik untuk proses industri maupun pembangkit listrik.
2. Lebih teliti dalam menentukan energi yang hilang dalam proses maupun yang dibuang ke udara.
3. Dapat menentukan kualitas energi.

Chand pada tahun 2013 melakukan penelitian mengenai analisis *exergy* pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) yang berlokasi di Genting Lanco, Vijayawada - India dengan kapasitas 112,4 MW. Pada penelitian tersebut Chand melakukan perhitungan nilai ireversibilitas pada masing-masing komponen yang terdapat pada PLTG tersebut dan didapat bahwa nilai *irreversibility* (pemusnahan *exergy*) terbesar terjadi pada *Combustion Chamber* [9].

Yilmazoglu pada tahun 2011 juga melakukan analisis *exergy* pada *Combined Cycle Power Plant* di Turki. Hasil penelitian menunjukkan total kehilangan *exergy* yang terjadi pada sistem sebesar 228,05 MW dan nilai efisiensi *exergy* 50,11%. Yang mana lokasi kehilangan *exergy* terbesar terjadi pada *combustion chamber* (ruang bakar) sebesar 165,1 MW atau sebesar 77,39% dari total kehilangan *exergy* pada sistem [10].

Hal yang sama juga dilakukan oleh Ameri pada tahun 2008 yang mana penelitian dilakukan pada *combined cycle power plant* dengan kapasitas 420 MW yang berlokasi di Neka. Pada penelitian ini dilakukan analisis pada komponen-komponen utama dari pembangkit seperti kompresor, *combustion chamber*, turbin gas, *duct burners*, HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*), *Stack*, turbin uap, kondensor dan sistem pendingin. Dan didapat lokasi pemusnahan *exergy* terbesar terjadi di *combustion chamber*, mengikuti HRSG pada posisi kedua [11].



Gambar 2 PLTGU Teluk Lembu

Dari paparan di atas hasil dari penelitian sebelumnya menyebutkan bahwa

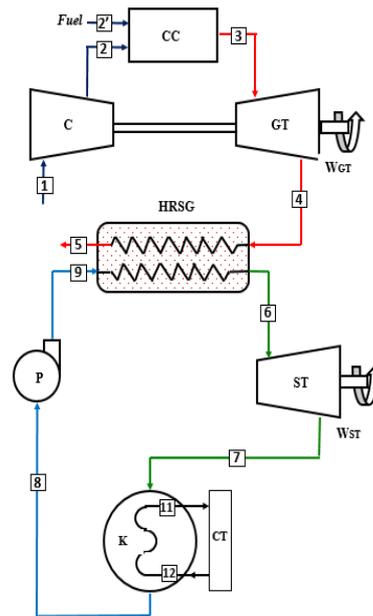
*combustion chamber* adalah penyebab utama irreversibilitas pada sistem PLTGU. Sehingga penulis tertarik untuk melakukan analisis *exergy* pada *combustion chamber* di pembangkit listrik tenaga gas-uap. Dalam penelitian ini, studi kasus analisis *exergy* ini diterapkan pada *combustion chamber* di pembangkit siklus kombinasi sistem gas-uap yang ada di unit PLTGU Teluk Lembu 30 MW. Studi ini dilakukan untuk mengetahui besar irreversibilitas (kehilangan *exergy*) dan nilai efisiensi *exergetic* pada *combustion chamber* Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU) Teluk Lembu 30 MW.

## 2. Metodologi

Guna memperkecil ruang lingkup dalam penelitian ini, maka penulis membatasi masalah yang akan dibahas sebagai berikut :

1. Analisis *exergy* dilakukan pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU) Teluk Lembu 30 MW dengan kombinasi operasi 1-1-1 yaitu terdiri dari 1 turbin gas, 1 *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG), dan 1 turbin uap,
2. Analisis *exergy* dilakukan dengan menggunakan parameter berupa data aktual operasi Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU) Teluk Lembu 30 MW.
3. Sampel data pada penelitian adalah data rata-rata aktual operasi mesin harian milik PLTGU Teluk Lembu pada bulan September 2014.
4. Analisis *exergy* yang dilakukan meliputi analisis *thermo-mechanic exergy* dan *chemical exergy*, sedangkan untuk *exergy* kinetik dan potensial nilainya diabaikan.
5. Pembahasan hanya dilakukan pada komponen utama PLTGU yaitu *combustion chamber*.

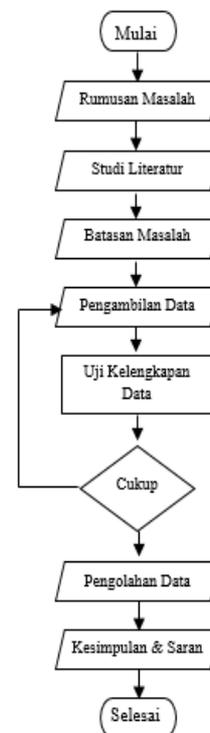
Berikut skema komponen yang ada di PLTGU Teluk Lembu 30 MW :



Keterangan Komponen :	Keterangan Gambar :
C = Compresor (Kompresor)	— Udara ideal
CC = Combustion Chamber ( Ruang Bakar)	— Gas Bertekanan
GT = Gas Turbine (Turbin Gas)	— Uap Air
HRSG = Heat Recovery Steam Generator	— Air
ST = Steam Turbine (Turbin Gas)	
K = Condenser (Kondensor)	
CT = Cooling Tower	
P = Pompa air kondensat	

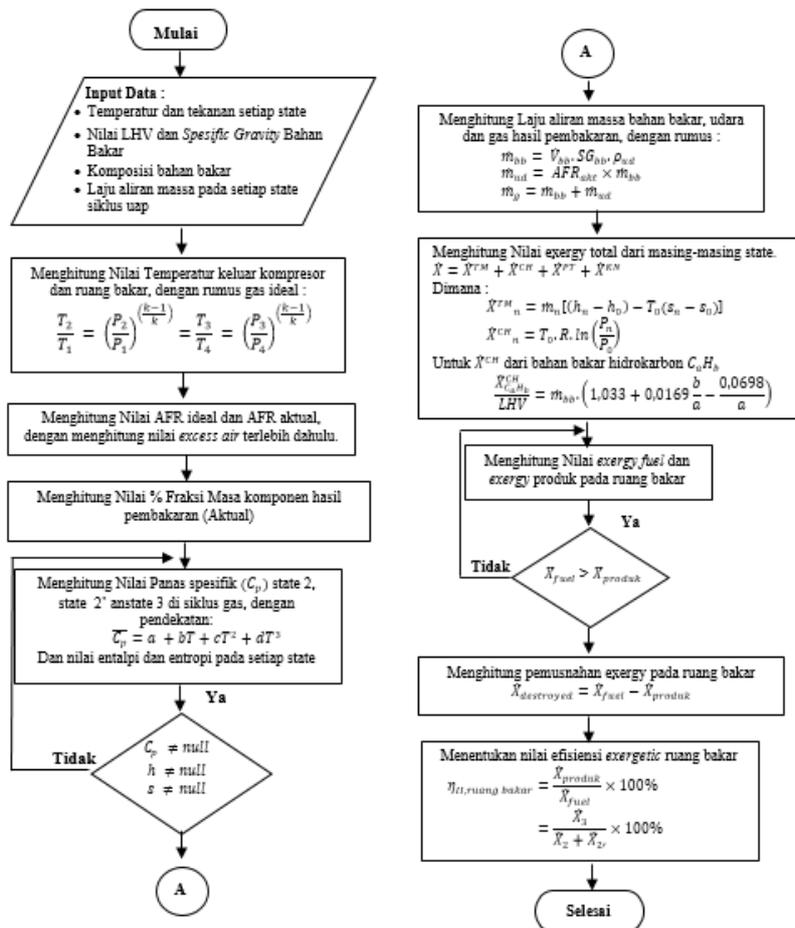
Gambar 3 Skema PLTGU Teluk Lembu 30 MW

### 2.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 4 Diagram Alir Penelitian

## 2.2 Diagram Alir Perhitungan



Gambar 5 Diagram Alir Perhitungan Analisis Exergy

## 3. Hasil Dan Pembahasan

### 3.1 Hasil

#### Analisis Exergy

Exergy total suatu sistem dibagi menjadi empat komponen, yaitu *exergy thermo-mechanical* ( $\dot{X}^{TM}$ ), *exergy kimia* ( $\dot{X}^{CH}$ ), *exergy kinetik* ( $\dot{X}^{KN}$ ) dan *exergy potensial* ( $\dot{X}^{PT}$ ) [12]. Dengan catatan tidak adanya efek nuklir, magnetik, elektrikal dan tegangan permukaan. Sehingga nilai *exergy* total dinyatakan dalam [12]:

$$\dot{X} = \dot{X}^{PH} + \dot{X}^{CH} + \dot{X}^{TM} + \dot{X}^{KN} \quad (1)$$

Energi potensial juga merupakan bagian dari *mechanical energy* dan dapat dikonversikan sepenuhnya dalam bentuk kerja. Karena itu, *exergy (work potential)* dari energi potensial sistem, nilainya sebanding dengan nilai energi potensial

tanpa ada pengaruh temperatur dan tekanan. Dirumuskan dengan persamaan [7]:

$$X^{PT} = g \cdot z \quad (kJ/kg) \quad (2)$$

Sedangkan *exergy kinetik* dirumuskan dengan persamaan [7]:

$$X^{KN} = \frac{1}{2} \cdot V^2 \quad (kJ/kg) \quad (3)$$

Komponen lain dari *physical exergy* adalah *Thermo-Mechanical Exergy* ( $\dot{X}^{TM}$ ), dapat diilustrasikan pada kasus sederhana dari gas ideal. Hubungan antara entalpi ( $h$ ) dan entropi ( $s$ ) ditunjukkan oleh persamaan di bawah ini [8]:

$$\dot{X}^{TM} = \dot{m} \cdot [(h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0)] \quad (4)$$

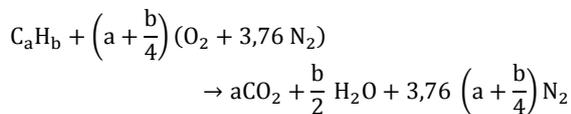
Untuk gas ideal, entalpi adalah fungsi dari temperatur, sedangkan entropi adalah fungsi sederhana dari keduanya (temperatur dan suhu). Persamaan 5 dan 6 menunjukkan

hubungan entropi dan entalpi, dengan asumsi konstanta panas spesifik ( $c_p$ ) di atas dapat diintegrasikan dari *state 0* ke *state* ( $T, p$ ) dengan entalpi  $h$  dan entropi  $s$  ke dalam persamaan berikut ini [8]:

$$h - h_0 = c_p \cdot (T - T_0) \quad (5)$$

$$s - s_0 = c_p \cdot \ln \frac{T}{T_0} - R \cdot \ln \frac{P}{P_0} \quad (6)$$

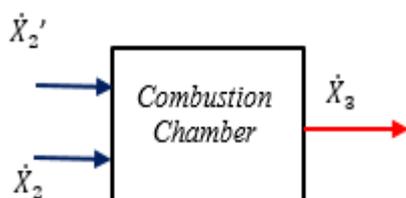
Pada *combustion chamber*, bahan bakar yang digunakan adalah senyawa hidrokarbon,  $C_aH_b$  yang bereaksi dengan udara pembakaran seperti oksigen ( $O_2$ ) dan nitrogen ( $N_2$ ), dengan persamaan reaksi :



Sehingga laju *exergy* kimia dari senyawa hidrokarbon dapat dinyatakan dalam suatu formulasi pendekatan untuk *exergy* kimia pada gas hidrokarbon, yaitu pada persamaan sebagai berikut [3] :

$$\frac{\dot{X}_{C_aH_b}^{CH}}{LHV} = \dot{m}_{bb} \cdot \left( 1,033 + 0,0169 \frac{b}{a} - \frac{0,0698}{a} \right) \quad (7)$$

Kehilangan *exergy* dihitung dari selisih *exergy fuel* dengan *exergy* produk. *Exergy fuel* diartikan sebagai sumber daya yang digunakan untuk menghasilkan produk sedangkan *exergy* produk diartikan sebagai *exergy* yang dihasilkan oleh sistem. *Exergy fuel* dan *exergy* produk untuk masing-masing komponen dijabarkan dalam gambar tabel dan di bawah ini :



Gambar 6 Skema Kesetimbangan *exergy* pada *Combustion chamber*

Tabel 1 *Exergy fuel* dan *exergy* produk

Komponen	<i>Exergy Fuel</i>	<i>Exergy Product</i>
<i>Combustion chamber</i>	$\dot{X}_2 + \dot{X}_2'$	$\dot{X}_3$

Dimana,  $\dot{X}_2$  adalah *exergy* yang keluar dari kompresor,  $\dot{X}_2'$  adalah *exergy* pada bahan bakar dan  $\dot{X}_3$  adalah *exergy* yang dihasilkan oleh *combustion chamber*.

Efisiensi eksergetik *combustion chamber* yang dilambangkan dengan  $\eta_{cc}$  merupakan perbandingan antara *exergy* yang dimanfaatkan dengan *exergy fuel*, sehingga efisiensi eksergetik *combustion chamber* dihitung dengan persamaan (8):

$$\eta_{IIcc} = \frac{\dot{X}_{\text{produk}}}{\dot{X}_{\text{fuel}}} \times 100\%$$

$$\eta_{IIcc} = \frac{\dot{X}_3}{\dot{X}_2 + \dot{X}_2'} \times 100\% \quad (8)$$

Dari perhitungan didapat nilai AFR udara aktual yang didapat adalah 51,09 (kg udara/kg bahan bakar), sehingga didapat nilai laju aliran massa bahan bakarnya sebesar 1,38 kg/s dan nilai laju aliran massa udara adalah 70,76 kg/s. Nilai-nilai ini digunakan untuk menghitung laju energi persatuan waktu nya atau daya pada masing-masing state di sistem. Sedangkan nilai laju aliran air dan uap pada siklus pembangkit uapnya didapat dari data harian pembangkit

Laju aliran *exergy* mengalami penurunan nilai lebih cepat dibanding dengan laju aliran energi, sebagai nilai kerugian pada setiap komponen. Perbedaan utama antara kesetimbangan energi dan *exergy* adalah pada kerugian yang terjadi (komponen yang hilang). Energi hilang dalam gas buang dan kalor buang kondensor, sementara *exergy* musnah oleh irreversibilitas sistem [13]. Nilai pemusnahan *exergy* dalam sistem dapat menggambarkan irreversibilitas dalam sistem tersebut. Dari perhitungan yang telah dilakukan maka nilai pemusnahan *exergy* dan rasio pemusnahan *exergy* pada *combustion chamber* dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 2 Tabel Hasil Kesenimbangan *Exergy*

Komponen	$\dot{X}_{fuel}$ (MW)	$\dot{X}_{produk}$ (MW)	$\dot{X}_{destroyed}$ (MW)	$\eta_{II,komp}$ (%)
Combustion Chamber	99,31	62,85	36,46	63,29

### 3.2 Pembahasan

Dari tabel yang dipaparkan sebelumnya dapat dilihat nilai dan rasio pemusnahan *exergy* pada *combustion chamber* dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU) Teluk Lembu 30 MW. Pemusnahan *exergy* yang terjadi pada *combustion chamber* yaitu sebesar 36,46 MW.

Efisiensi *exergy* didapat dari perbandingan antara nilai *exergy* produk dengan nilai *exergy fuel* pada *combustion chamber*. Efisiensi *exergy* juga sering disebut dengan efisiensi hukum kedua termodinamika. Efisiensi *exergy* yang terjadi pada *combustion chamber* sebesar 63,29%.

*Combustion chamber* merupakan lokasi pemusnahan *exergy* terbesar dari sistem [10], dimana terjadi pemusnahan *exergy* sebesar 36,46 MW. Walaupun merupakan lokasi dengan nilai pemusnahan *exergy* terbesar, *combustion chamber* sendiri memiliki efisiensi *exergetic* yang cukup besar sebesar 63,2 %. Besarnya *exergy* yang musnah dalam *combustion chamber* disebabkan karena beberapa hal, yaitu diantaranya :

- 1) Irreversibilitas akibat reaksi pembakaran, pada *combustion chamber* terjadi pembakaran yang tidak sempurna (terdapat *excess air* 305%). Yang mana mengakibatkan turun nya temperatur produk pembakaran yang digunakan untuk menggerakkan turbin gas.
- 2) Irreversibilitas yang terjadi akibat reaksi kimia yang memungkinkan terjadi perpindahan panas antar aliran ke aliran.
- 3) Nilai LHV (*Lower Heating Value*) yang rendah, sehingga mengakibatkan  $Q_{in}$  rendah.

Upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi irreversibilitas yang terjadi pada

*combustion chamber* diantaranya dengan melakukan proses pemanasan terlebih dahulu pada udara pembakaran, guna menurunkan nilai AFR (*Air Fuel Ratio*).

Analisis yang dilakukan dan solusi yang diberikan hanya berdasarkan pada keadaan fisik yang terjadi pada sistem. Sedangkan solusi lainnya dapat saja diberikan seperti peningkatan teknologi pada sistem, guna mengoptimalkan kerja dari sistem tersebut.

Akan tetapi guna menyeimbangkan solusi fisik dan teknologi yang akan dilakukan, harus juga mempertimbangkan aspek ekonomi, guna mendapatkan keuntungan yang optimal. Perawatan dan peningkatan teknologi akan mempengaruhi biaya operasional perusahaan, sehingga berpengaruh juga terhadap harga jual listrik ke masyarakat luas.

### 4. Kesimpulan

Dari analisis yang telah dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan, yaitu sebagai berikut :

1. Besar nilai pemusnahan *exergy* pada *combustion chamber* yaitu sebesar 36,46 MW
2. Nilai efisiensi *exergetic* yang terjadi pada *combustion chamber* adalah sebesar 63,29%

### Ucapan Terimakasih

Terimakasih yang sedalam-dalamnya penulis ucapkan kepada PLTGU Teluk Lembu yang telah memberikan informasi berupa data yang dibutuhkan penulis dalam penelitian ini. Selanjutnya kepada Dosen pembimbing penulis Bapak Dr. Awaludin Martin, S.T., M.T. dan juga kepada semua keluarga Teknik Mesin Universitas Riau.

### Daftar Pustaka

- [1] Data Statistics PLN. 2007. "*Konsumsi Listrik yang Dipenuhi PLN di Indonesia tahun 1995-2007*". PT. PLN (PERSERO).
- [2] Pusat Data dan Informasi Kementrian ESDM. 2010. "*Indonesia Energy*

- Outlook 2010 (IEO 2010)*".  
Kementrian ESDM
- [3] Moran, M. J., Shapiro, H. N., 2007. "*Fundamentals of Engineering Thermodynamics*". John Wiley & Sons: New York:
- [4] Colpan, Can OzGur. 2005. "*A Thesis : Exergy Analysis Of Combined Cycle Cogeneration System*". The Graduate School of Natural And Applied Sciences of Middle East Technical University.
- [5] Rant,Zoran. 1956. "*Exergye ein neues Wort für Technische Arbeitsfähigkeit*" Dipublikasikan di: Forsch. Ing. Wes., Vol. 22, p.36-37., 1956.
- [6] Tsatsaronis, G. 2007 "*Definition and Nomenclature in Exergy Analysis and Exergoeconomocs*". Dipublikasikan pada : Energy Intl.J (Internasional Journal). 32,p 249
- [7] Cengel, Yunus A.2005 "*Thermodynamics An Engineering Approach*". Mc.Graw Hill Education: New York
- [8] Truls, Gundenser. 2009."*An Introduction to the Concept of Exergy and Energy Quality Version 3*". Thesis: Department of Energy and Process Engineering Norwegian University of Science and Technology Trondheim: Norway
- [9] Chand, V. Tara, dkk. 2013."*Exergy Analysis of Gas Turbine Power Plant*". Dipublikasikan pada : International Journal of Engineeing Trends and Thecnology (IJETT)-Volume 4 Issue 9- Sept 2013.
- [10] Yilmazoğlu, Mustafa Zeki dan Amiradebin Ehsan. 2011."*Second Law and Sensitivity Analysis of a Combined Cycle Power Plant in Turkey*". Publish: J. of Thermal Science and Technology, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 31,2, 41-50, 2011
- [11] Ameri M, P. Ahmadi dan S. Khanmohammadi. 2008. "*Exergy Analysis of a 420 MW Combined Cycle Power Plant*". Dipublikasikan pada: International Journal of Energy Research (Int. J. Energy Res). 2008; 32: 175-183.
- [12] Bejan, A., Tsatsaronis G., Moran M. 1996. "*Thermal design and optimization*", John Wiley and Sons Inc. : USA
- [13] Kail, C., AG, Siemen, Erlangen. 1998. "*Evaluation of Advance Combined Cycle Power Plants*". Dipublikasikan pada: Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Vol 212 Part A, London 198.