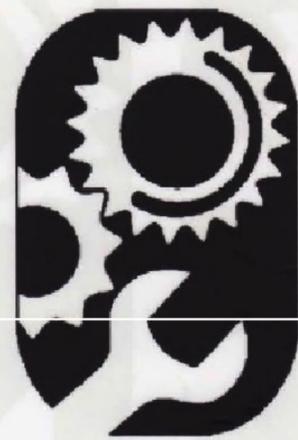


PROCEEDING

SEMINAR NASIONAL TEKNIK MESIN 3



30 APRIL 2008
UNIVERSITAS KRISTEN PETRA
SURABAYA

REKAYASA DAN INOVASI DESAIN
MELALUI KERJASAMA RISET
PERGURUAN TINGGI DAN INDUSTRI
UNTUK TERUS MEMBANGUN DAN
MEMAJUKAN BANGSA

Tim Editor :
Joni Dewanto
Willyanto Anggono



JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS KRISTEN PETRA
Jl. Siwalankerto 142-144 Surabaya 60236

ISBN 978-979-25-4412-1



9 789792 544121

ISBN 978-979-25-4412-1

Proceeding

SEMINAR NASIONAL TEKNIK MESIN 3
"REKAYASA DAN INOVASI DESAIN MELALUI
KERJASAMA RISET PERGURUAN TINGGI DAN
INDUSTRI UNTUK TERUS MEMBANGUN DAN
MEMAJUKAN BANGSA"

SURABAYA, 30 APRIL 2008



Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Kristen Petra
Jl. Siwalankerto 142-144, Surabaya 60236

SUSUNAN PANITIA

Panitia Pelaksana:

Pelindung	: Ketua Jurusan Teknik Mesin UK. Petra.
Ketua Panitia	: Ian Hardianto Siahaan, S.T., M.T.
Sekretaris	: Ir. Ninuk Jonoadji, M.T.
Bendahara	: Amelia Sugondo, S.T.,M.T.
Acara	: Ir. Ekadewi Anggraini Handoyo, M.Sc.
Editor	: Ir. Joni Dewanto, M.S. Willyanto Anggono, S.T.,M.Sc.
Publikasi	: Stefanus Ongkodjojo, S.T., M.Sc.

Tim Pengarah (Reviewer):

Prof. Dr. Ir. I Nyoman Sutantra, M. Sc., Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Dr. Ing. Suwandi Sugondo, PT. Agindo.

Dr. Ir. I Wajan Berata, DEA., Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Houtman P Siregar, PhD., Intistitut Teknologi Indonesia.

Ir. Rini Dharmastiti, M.Sc., PhD., Universitas Gadjah Mada.

Dr. Juliana Anggono, S.T., M.Sc., Universitas Kristen Petra.

Dr. Ir. Winarto, M.Sc., Universitas ndonesia.

Ir. Sunaryo, PhD, C.Eng, MRINA, MIMarEst., Universitas Indonesia.

Keynote Speaker:

Prof. Dr. Ir. I Nyoman Sutantra, M. Sc., Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

13. Kaji Sistem Siklus Gabungan Pada Pembangkit Listrik Turbin Gas Di Pt. Meta Epsi Pejebe Power Generation Berkapasitas 2x40 Mw (Hasan Basri dan Gugi Tri Handoko).	80
14. Karakteristik Temperatur Maksimum Nyala Api Pembakaran Non Difusi Gas Propana Dengan Teknik Pencitraan Nyala (<i>Infra Red Thermography</i>) (I Made Kartika Dhiputra, Eko Warsito, Cokorda Prapti Mahandari).	89
15. Listrik Energi Surya 3000 VA, 8A, 3 x 220 V, 50 Hz, (Ir Suprpto, MT dan Nurman ST)	93
16. Performansi Mesin Refrigerasi Hibrida pada Perangkat Pengkondisian Udara Menggunakan Refrigeran Hidrokarbon Substitusi R-22 (Azridjal Aziz)	96
17. Perubahan Panjang Nyala Api Pada Fenomena " <i>Flame Lift-Up</i> " Akibat Letak Ketinggian Posisi Ring " <i>Flame-Hold</i> " (I Made Kartika Dhiputra, Hamdan Hartono A., Cokorda Prapti Mahandari).	101
18. Pengaruh Pergeseran Waktu Injeksi Terhadap Performa Dan Opasitas Motor Diesel (Arifin Nur).	105
19. Penggunaan Serabut Kelapa Sebagai Bantalan Pada <i>Evaporative Cooler</i> (Ir. Ekadewi A. Handoyo, MSc., Fandi Dwiputra Suprianto, ST, MSc. Selrianus).	111
20. Pengaruh Suhu Terhadap Sifat Fisik Dan Konversi Biodiesel Pada Transesterifikasi Minyak Kelapa (Dr. Slamet Wahyudi ST.,MT dan Wulandari, ST)	118
21. Rancang Bangun Dan Analisis Pengujian Mesin Pendingin Temperatur Rendah Berkapasitas Kecil Menggunakan Metode <i>Cascade</i> (Sumeru, Andriyanto Setyawan)	124
22. Reduksi Emisi Gas Buang CO dan HC pada Motor Bensin dengan Menggunakan Katalitis Zeolit (Philip Kristanto).	133
23. Reduksi Emisi Nox Pada Motor Bakar Diesel Dengan Menggunakan Metode Injeksi Ganda (A.Praptijanto, A. Saepudin, A.Muharam1, Wuryaningsih).	139
24. Studi Banding Performansi Motor Disel Isuzu 4 JA-1 Injeksi Langsung Sistim Force Induction Dengan dan Tanpa Intercooler (Philip Kristanto).	146
25. Studi Eksperimental Dan Numerik Karakteristik Boundary Layer Pada Permukaan Pelat Datar Dengan Gangguan Sebuah Obstacle Berbentuk Circular (Wawan Aries Widodo dan Sutardi).	153
26. Studi Eksperimental Dan Numerik Karakteristik Boundary Layer Pada Permukaan Pelat Datar Dengan Gangguan Sebuah Obstacle Berbentuk Rectangular (Sutardi ; WawanAries Widodo).	161
27. Three-Dimensional Radiative Heat Transfer Computation By Monte Carlo Method Using Object Oriented Programming (Yatna Yuwana Martawirya, Hendi Riyanto, Franky Simamora).	169

D2-TEKNOLOGI PENGEMBANGAN MATERIAL DAN PROSES MANUFAKTUR



Sertifikat



Diberikan kepada

HASAN BASRI

Atas partisipasinya sebagai

Pemakalah

dalam

**SEMINAR NASIONAL
TEKNIK MESIN 3**

"REKAYASA DAN INOVASI DESAIN MELALUI KERJASAMA RISET PERGURUAN TINGGI
DAN INDUSTRI UNTUK TERUS MEMBANGUN DAN MEMAJUKAN BANGSA"

Surabaya, 30 April 2008



Ketua Jurusan Teknik Mesin

[Signature]
Ir. Didi Wahjudi, M.Sc, M.Eng

Ketua Panitia



[Signature]
Ian Hardianto Siahaan, S.T, M.T

SEMINAR NASIONAL



KAJI SISTEM SIKLUS GABUNGAN PEMBANGKIT LISTRIK TURBIN GAS DI PT. META EPSI PEJEBE POWER GENERATION 2X40 MW

Hasan Basri¹⁾, Gugi Tri Handoko²⁾

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya^{1,2)}

Jl. Raya Palembang - Prabumulih KM.32 Inderalaya 30662^{1,2)}

Telp. (0711) 580739^{1,2)}

E-mail : hasan_basri@unsri.ac.id¹⁾, handoko_gt21@yahoo.co.id²⁾

ABSTRAK

Kebutuhan akan daya listrik semakin meningkat dari tahun ke tahun seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk dunia. Penggunaan turbin gas sebagai pembangkit listrik telah banyak digunakan. Turbin gas GE LM600 PC Sprint merupakan turbin gas aeroderivative, yang desainnya diambil dari turbin penggerak pesawat terbang CF6-80C2 Turbofan. Setelah mengalami penyesuaian, maka penggunaannya dapat diaplikasikan sebagai turbin gas industri. Selama ini pembangkit listrik khususnya pembangkit listrik turbin gas hanya menggunakan sistem konvensional untuk menghasilkan daya listrik. Dengan menggunakan data operasional dari Turbin Gas GE LM6000 PC Sprint dan studi literatur, didapat siklus gabungan tanpa pembakaran tambahan memanfaatkan gas buang Turbin Gas. Dengan menggunakan sistem siklus gabungan tanpa pembakaran tambahan diharapkan daya yang dihasilkan meningkat daripada menggunakan sistem konvensional. Daya listrik yang didapatkan dengan sistem konvensional sekitar 101,4 MW dengan efisiensi turbin gas 43,48%. Tetapi dengan sistem siklus gabungan tanpa pembakaran tambahan, daya yang dihasilkan sebesar 118,2 MW. Berarti terjadi penambahan daya sebesar 16,7 MW dengan efisiensi siklus gabungan sebesar 56,92%. Penghematan pemakaian bahan bakar dengan siklus gabungan sekitar 14,2 % atau 48,63 ton/hari.

Kata Kunci: turbin gas, pembangkit listrik, siklus gabungan.

1. PENDAHULUAN

Latar Belakang

Kebutuhan akan daya listrik semakin lama semakin meningkat seiring dengan pertambahan jumlah penduduk dunia yang semakin meningkat. Pengembangan teknologi semakin meningkat menuntut manusia melakukan peningkatan kualitas pemakaian bahan bakar fosil. Upaya peningkatan dimulai dari perbaikan operasi, pemeliharaan peralatan hingga mengubah desain pabrik. Selama ini pembangkit listrik menggunakan sistem konvensional yang dipakai menghasilkan daya listrik. Karena itu dikembangkan sistem siklus gabungan untuk meningkatkan daya yang dihasilkan oleh pembangkit listrik. Keuntungan dari menggunakan sistem siklus gabungan yaitu:

- Meningkatkan efisiensi konversi energi dan penggunaannya.
- Penghematan biaya yang besar menjadikan industri atau sektor komersial lebih kompetitif dan juga dapat memberikan tambahan panas untuk dapat digunakan untuk keperluan lainnya.
- Memberikan kesempatan lebih lanjut untuk membangkitkan listrik lokal yang didesain sesuai kebutuhan konsumen lokal dengan efisiensi tinggi.
- Emisi lebih rendah pada lingkungan, khususnya pada CO₂

Tujuan dan Manfaat

Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan analisis energi pada turbin gas sehingga diketahui tingkat efisiensi turbin gas, mengetahui besarnya nilai kalor pada masing-masing komponen HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*), mengetahui besarnya daya listrik yang dapat dihasilkan dengan menggunakan sistem siklus gabungan, mengetahui dengan penggunaan siklus gabungan dari pemanfaatan panas buang dari *exhaust* turbin gas terjadi penghematan pemakaian bahan bakar.

Manfaat dari penelitian ini yaitu mengetahui melalui penggunaan sistem siklus gabungan dapat menghemat penggunaan bahan bakar fosil, memberikan gambaran kualitas panas buang yang dapat dimanfaatkan, mengurangi tingkat emisi pada turbin gas dengan menggunakan siklus gabungan.

Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian yang penulis gunakan dalam menganalisa kajian ini adalah

1. Metode observasi/survey, yaitu dengan melihat langsung ke lokasi, khususnya pada pembangkit listrik turbin gas yaitu pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas milik PT. Meta Epsi Pejebe Power Generation (MEPPO-Gen).
2. Metode pengumpulan data dengan mengambil data di pembangkit listrik yang memiliki turbin gas

Pembangkit Listrik Tenaga milik PT. Meta Epsi Pejebe Power Generation (MEPP0-Gen).

3. Studi pustaka dengan membahas dan mengkaji aspek-aspek yang ada di lapangan, kemudian mencari literatur-literatur yang menunjang pembahasan dan pengkajian tersebut.
4. Membuat diagram siklus siklus gabungan tanpa pembakaran tambahan.
5. Analisa data dan pembuatan kesimpulan, dilakukan setelah melakukan studi literatur yang menunjang.

2. TINJAUAN PUSTAKA

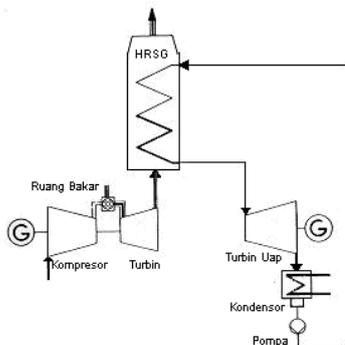
Perkembangan Teknologi Siklus Gabungan

Secara historis teknologi siklus gabungan sudah ada pada awal abad ke 20. Pada tahun 1900 di Amerika Serikat sekitar 60% kebutuhan listrik untuk kebutuhan industri disuplai oleh siklus gabungan. Pada tahun 1972 hanya sekitar 5% suplai listrik untuk industri dibangkitkan oleh siklus gabungan.

Dalam penelitian mengenai analisa siklus gabungan “*New And Advanced Energy Conversion Technologies, Analysis Of Cogeneration, Combined and Integrated Cycles*” (Korobitsyn, M.A, 1998) mengenai performa turbin gas dengan analisa siklus gabungan. Menurut Korobitsyn, kurang efisiennya kerja turbin gas dan juga meningkatkan performanya dilakukan modifikasi seperti dengan cara rekuperasi dan juga *intercooling*, dan dengan pemanasan ulang. Karena itu pengembangan teknologi di bidang konversi khususnya pada turbin gas salah satunya dilakukan dengan menggunakan teknologi siklus gabungan.

Definisi Siklus Gabungan

Siklus gabungan merupakan penggabungan dua atau lebih siklus mekanis menjadi satu sistem pembangkit listrik. Sistem siklus gabungan terdiri dari sejumlah komponen mesin penggerak, generator, dan pemanfaatan kembali panas tergabung menjadi suatu integrasi. Jenis peralatan yang menggerakkan seluruh sistem, mengidentifikasi secara khusus sistem siklus gabungan. Dengan cara ini industri dapat meminimalkan biaya penggunaan bahan bakar. Siklus dasar siklus gabungan dapat dilihat pada Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Diagram siklus dasar siklus gabungan [6]

Keuntungan dan Aplikasi Sistem Siklus Gabungan

Keuntungan dengan menggunakan sistem siklus gabungan pada turbin gas adalah :

1. Meningkatkan efisiensi konversi energi dan penggunaannya.
2. Penghematan biaya yang besar menjadikan industri atau sektor komersial lebih kompetitif.
3. Emisi lebih rendah terhadap lingkungan.
4. Memberikan kesempatan untuk membangkitkan listrik lokal yang didesain sesuai kebutuhan konsumen lokal dengan efisiensi tinggi, menghindari kehilangan transmisi. Khususnya pada penggunaan bahan bakar gas alam

Aplikasi dengan menggunakan sistem siklus gabungan antara lain industri farmasi dan kimia, pembangkit listrik, industri pupuk., pabrik semen, industri tekstil, industri besi dan logam

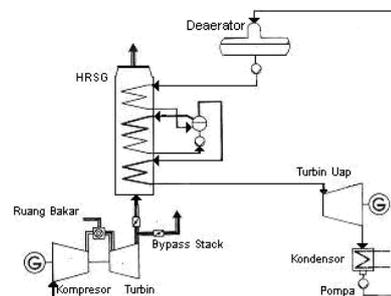
Jenis-Jenis Sistem Siklus gabungan

Berdasarkan jenis sistem siklus gabungan yang paling banyak digunakan dalam pemanfaatan panas sisanya, ada tiga jenis sistem siklus gabungan, yaitu :

1. Sistem siklus gabungan tanpa pembakaran tambahan.
2. Sistem siklus gabungan dengan pembakaran tambahan.
3. Sistem Siklus gabungan turbin gas siklus tertutup

Sistem Siklus Gabungan Tanpa Pembakaran Tambahan.

Siklus gabungan tanpa pembakaran tambahan merupakan suatu siklus gabungan yang menggunakan turbin gas sebagai penggerak mula. Gas buang yang meninggalkan turbin gas dengan temperatur yang masih tinggi (sekitar 400⁰ C) memiliki kandungan energi sekitar 70% dari energi input. Gas buang tersebut dimanfaatkan untuk menghasilkan uap dengan menggunakan “*Heat Recovery Steam Generator*” (HRSG). Siklus gabungan tanpa pembakaran tambahan dapat dilihat pada Gambar 2 di bawah ini.



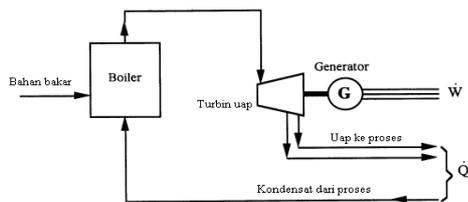
Gambar 2. Siklus Gabungan Tanpa Pembakaran Tambahan [6]

Efisiensi siklus gabungan tanpa pembakaran tambahan mencapai 60% dengan efisiensi listrik sekitar 35%. Siklus gabungan tanpa pembakaran tambahan mempunyai jangkauan pemakaian yang luas. Karena itu

biaya operasi siklus gabungan tanpa pembakaran tambahan lebih murah daripada siklus gabungan dengan pembakaran tambahan.

Turbin Uap Tekanan Balik

Turbin uap tekanan balik merupakan rancangan yang paling sederhana. Uap keluar turbin pada tekanan yang lebih tinggi/sama dengan tekanan atmosfer, tergantung pada kebutuhan beban panas. Hal ini menyebabkan digunakannya istilah tekanan balik. Uap yang keluar dari turbin memiliki tekanan 2-6 bar dengan suhu 120°C, kemudian ke kondensor. Siklus turbin uap dengan tekanan balik dilihat pada Gambar 3 di bawah.



Gambar 3. Diagram Siklus Sistem Turbin Uap Tekanan Balik

Karena itu, terdapat kebutuhan bagi hubungan dua arah jaringan listrik untuk pembelian listrik tambahan atau penjualan listrik berlebih yang dihasilkan. Untuk meningkatkan produksi listrik dapat dilakukan dengan membuang uap secara langsung ke atmosfer.

Pengkajian Sistem Siklus gabungan

Kinerja keseluruhan :

➤ Laju panas keseluruhan (kcal/kWh) [3],

$$= \frac{M_s \cdot (h_s - h_w)}{\text{Energi keluar (kW)}} \quad (1)$$

dimana :

M_s = Laju alir massa uap (kg/jam)

h_s = Entalpi uap (kKal/kg)

h_w = Entalpi air umpan (kKal/kg)

➤ Laju bahan bakar keseluruhan (kg/kWh) [3]:

$$= \frac{\text{Pemakaian Bahan Bakar (kg / jam)}}{\text{Energi keluar (kW)}} \quad (2)$$

Kinerja turbin gas :

➤ Efisiensi turbin gas keseluruhan (%) [3]:

$$= \frac{\text{Energi keluar (kW)}}{\text{Bhn bakar} \cdot T_{\text{Gas}} (\text{kg}) \cdot \text{GCV}_{\text{gas}} (\text{kcal / kg})} \cdot 100\% \quad (3)$$

Kinerja HRSG:

➤ Efisiensi HRSG (%) [8]:

$$\frac{M_s \cdot (h_s - h_w)}{[M_f \cdot C_p (t_{(in)} - t_{(out)})] + [M_{aux} \cdot \text{GCV}_{\text{gas}} (\text{kKal / kg})]} \cdot 100\% \quad \dots \quad (4)$$

dimana :

M_s = Uap yang dihasilkan (kg/jam)

h_s = Entalpi uap (kKal/kg)

h_w = Entalpi air umpan (kKal/kg)

M_f = Aliran massa gas buang (kg/jam)

T_{in} = Suhu Masuk Gas Buang (°C)

T_{out} = Suhu keluar gas buang (°C)

M_{aux} = Pemakaian bahan bakar (kg/jam).

Kinerja siklus gabungan :

➤ Daya yang dibangkitkan dengan siklus gabungan (kW) [6],

$$= \frac{\eta_{GT} + \eta_{ST} (1 - \eta_{ST})}{\eta_{GT}} \quad (5)$$

Turbin Gas

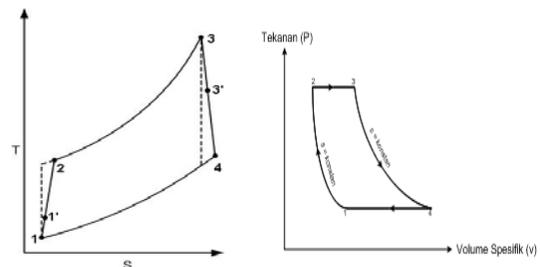
Turbin gas merupakan mesin penggerak yang memanfaatkan energi fluida yang terkandung dalam gas sebagai fluida kerjanya. Energi fluida yang mempunyai energi kinetik tinggi tersebut dimanfaatkan untuk mendorong sudu, sehingga menghasilkan gerak putar pada rotor. Energi kinetik tersebut didapatkan dari hasil proses ekspansi gas setelah gas mengalami proses pembakaran. Siklus dasar dari turbin gas menggunakan siklus Brayton sesuai dengan nama penemunya yaitu George Brayton, seorang insinyur berasal dari Boston.

Proses yang terjadi pada sistem turbin gas adalah :

- Pemampatan (*Compression*), udara luar dihisap dan dimampatkan.
- Pembakaran (*Combustion*), udara dan bahan bakar dicampur dan dibakar.
- Kerja (*Expansion*), gas hasil pembakaran memuai dan mengalir keluar melalui nozzle.
- Pembuangan gas (*Exhaust*), gas hasil pembakaran dikeluarkan ke atmosfer.

Siklus Brayton

Siklus dasar dari turbin gas menggunakan siklus Brayton sesuai dengan nama penemunya yaitu George Brayton, seorang insinyur yang berasal dari Boston. Siklus Brayton digambarkan pada diagram P-v dan T-s pada Gambar 4 di bawah ini.



Gambar 4. Siklus Brayton untuk turbin gas [3]

Siklus Brayton terdiri dari proses :

- 1-2 : Proses kompresi isentropik di dalam kompresor
- 2-3 : Proses pemasukan kalor pada tekanan konstan di dalam ruang bakar atau alat pemindah kalor.
- 3-4 : Proses ekspansi isentropik di dalam turbin
- 4-1 : Proses pembuangan tekanan konstan dalam alat pemindah kalor (pendingin).

Siklus ideal dari sistem turbin gas sederhana dengan siklus terbuka mempergunakan ruang bakar, sedangkan sistem turbin gas sederhana dengan siklus tertutup mempergunakan alat pemindah kalor, seperti pada Gambar 5.

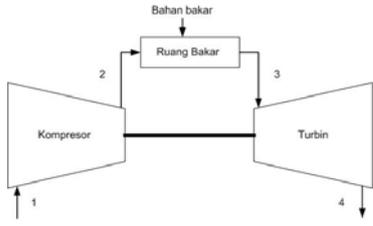
Sistem turbin gas berdasarkan siklus Brayton :

a. Siklus Terbuka (*Open Cycle*)

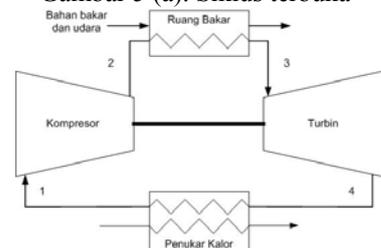
Gas hasil pembakaran setelah diekspansikan dibuang ke atmosfer. Bahan bakar yang digunakan masuk ke sistem.

b. Siklus Tertutup (*Closed Cycle*)

Pembakaran terjadi diluar sistem, hanya panasnya yang dimasukkan ke dalam sistem



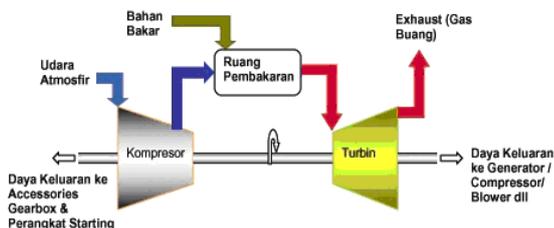
Gambar 5 (a). Siklus terbuka



Gambar 5 (b). Siklus tertutup

Prinsip Kerja Turbin Gas

Turbin gas adalah alat yang mengubah energi kalor menjadi energi mekanis secara teratur dan kontinu. Fluida kerja yang digunakan ialah gas panas hasil pembakaran campuran bahan bakar dengan udara yang dibakar dalam ruang bakar dimana udara terlebih dahulu dinaikkan tekanannya dengan menaikkan tekanan udara pada kompresor. Kerja mekanis yang dihasilkan akibat diekspansikannya fluida kerja pada turbin. Dimana ekspansi fluida kerja tersebut pada sudu turbin menyebabkan rotor turbin berputar dan menghasilkan kerja mekanis. Besarnya tenaga kinetis yang dihasilkan fluida kerja dapat diatur dengan mengatur jumlah kalor yang masuk ke ruang bakar. Skema kerja turbin gas dapat dilihat pada Gambar 6 di bawah ini.



Gambar 6. Skema Kerja Turbin Gas

Komponen – komponen Utama Turbin Gas

1) Kompresor

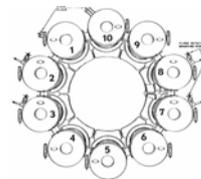
Kompresor adalah komponen dari turbin gas yang berfungsi menaikkan tekanan udara sebelum masuk ke ruang bakar. Kompresor ini dihubungkan langsung dengan turbin. Jenis kompresor yang digunakan kompresor dinamik. Hal ini karena aliran dalam

kompresor berlangsung kontinu sehingga suplai udara ke turbin tidak terputus. Prinsip kerja kompresor, sudu kompresor yang berputar akan mendorong udara sehingga udara mengalir dan karena lintasannya makin sempit maka tekanan udara makin besar. Saat udara keluar dari sudu kompresor tingkat akhir melalui diffuser udara sehingga tekanan bertambah dan udara keluar ke ruang bakar.

2) Ruang Bakar (*Combustion Chamber*)

Ruang bakar adalah tempat terjadinya proses pembakaran bahan bakar dan udara. Hasil pembakaran ini berupa energi panas yang disalurkan ke turbin. Jenis ruang bakar pada turbin gas bermacam-macam tergantung dari klasifikasinya. Ditinjau berdasarkan bentuk dari susunannya ruang bakar dapat dibagi atas:

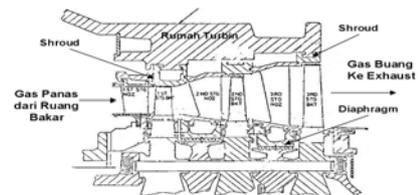
- a) *Can Type Combustion Chamber*
- b) *Annular Type Combustion Chamber*
- c) *Cannular Type Combustion Chamber*



Gambar 7. Ruang Bakar Turbin Gas

3) Turbin

Turbin berfungsi untuk mengubah energi panas dalam gas panas hasil pembakaran dari ruang bakar menjadi energi mekanis/energi putar. Turbin terdiri dari sudu tetap yang berfungsi merubah energi panas atau entalpi yang terkandung dalam gas menjadi energi kecepatan dan sudu gerak yang merubah kecepatan menjadi energi mekanis.



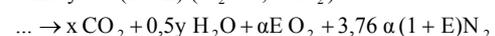
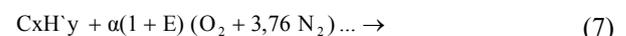
Gambar 8. Bagian komponen turbin

Reaksi Pembakaran

Pembakaran dilakukan dengan mereaksikan bahan bakar dengan oksigen yang terkandung dalam udara. Bila rumus kimia bahan bakar dinyatakan dalam C_xH_y , persamaan umum pembakaran [4] sebagai berikut :



Bila bahan bakar dibakar pada kondisi stokiometrinya (dengan udara berlebih/*excess air*) akan menghasilkan campuran miskin (*lean/weak mixture*), sehingga persamaan akan menjadi [4],



dimana E adalah persentase *excess air*.



Heat Recovery Steam Generator (HRSG)

HRSG adalah suatu sistem pembangkit uap yang memanfaatkan kalor dari turbin gas. HRSG terdiri dari tiga bagian utama yaitu *economizer*, *evaporator* dan *superheater*. Uap setelah keluar dari superheater akan dimasukkan ke desuperheater untuk menurunkan temperatur dan tekanan uap dengan cara menginjeksikan *boiler feed water* (BFW), kemudian di distribusikan.

Uraian Bagian Pada Komponen HRSG

1. Economizer

Economizer berfungsi untuk memberikan pemanasan awal dari BFW sebelum masuk ke *steam drum*. Sehingga jika BFW tidak masuk *preheater* terlebih dahulu maka pada saat BFW masuk *steam drum* akan terjadi *hammering* yang disebabkan karena perbedaan temperatur antara BFW dengan *steam drum* yang terlalu besar. Dengan *economizer* tersebut maka suhu BFW dibuat mendekati suhu *steam drum*.

2. Evaporator

BFW yang masuk ke *economizer* kemudian ke *steam drum*, selanjutnya BFW tersebut dari *steam drum* dipanaskan lebih lanjut ke *evaporator* menjadi suhu 260 °C agar terbentuk uap jenuh, kembali ke *steam drum* untuk di pisahkan uap jenuh dari BFW.

3. Superheater

Superheater mengubah uap dari *saturated vapor* menjadi *superheated vapor* dengan suhu 400-440°C.

4. Steam Drum

Steam drum adalah suatu bejana yang dibuat dengan konstruksi tertentu. Pada ujungnya *Man Hole* dan pada tempat-tempat tertentu di dindingnya terpasang pipa-pipa hubungan untuk air, *steam*, bahan kimia.

Kalor pada gas asap (*flue gas*) pada HRSG

Pada HRSG Kalor gas asap (*flue gas*) mempunyai tekanan dan temperatur yang tinggi sehingga membuat proses pembakaran yang sempurna, secara umum gas yang dihasilkan mengandung CO, CO₂, H₂O, dan N₂. Kalor yang dilepaskan [8],

$$Q_{fg} = m_{fg} \cdot C_p \cdot (\Delta T) \quad (8)$$

dimana:

- m_{fg} = Massa aliran *flue gas*, kg/s
- C_p = Kalor spesifik gas asap (*flue gas*) kJ/kg.°C
- $T_{i\ fg}$ = Temperatur inlet *flue gas*, °C
- $T_{o\ fg}$ = Temperatur outlet *flue gas*, °C

Perpindahan Kalor pada Komponen HRSG

Energi balance:

$$Q_{in} = Q_{out}$$

Kalor yang melepaskan = Kalor yang diserap

Dimana :

1. Kalor yang masuk (Q_{in}) = Q_{fg}
2. Kalor yang diserap:

a). Perpindahan kalor di *economizer* (Q_{eco}) [8],

$$Q_{eco} = m_{eco} \cdot (\Delta H) \quad (9)$$

dimana :

- m_{eco} = laju aliran massa di *economizer*, kg/h
- $h_{o\ eco}$ = entalpi spesifik pada outlet *economizer*, kJ/kg
- $h_{i\ eco}$ = entalpi spesifik pada inlet *economizer*, kJ/kg

b). Perpindahan kalor di di *evaporator* (Q_{ev}) [8],

$$Q_{ev} = m_{ev} \cdot (\Delta H) \quad (10)$$

dimana :

- m_{ev} = laju aliran massa di *evaporator*, kg/h
- $h_{o\ ev}$ = entalpi spesifik pada outlet *evaporator*, kJ/kg
- $h_{i\ ev}$ = entalpi spesifik pada inlet *evaporator*, kJ/kg

c). Perpindahan kalor di *Superheater* (Q_{sh}) [8],

$$Q_{sh} = m_{sh} \cdot (\Delta H) \quad (11)$$

dimana :

- m_{sh} = laju aliran massa di *superheater*, kg/h
- $h_{o\ sh}$ = entalpi spesifik pada outlet *superheater*, kJ/kg
- $h_{i\ sh}$ = entalpi spesifik pada inlet *superheater*, kJ/kg

Dengan asumsi bahwa perpindahan kalor antara alat penukar kalor dengan lingkungan diabaikan seperti pengabaian tentang perubahan energi kinetik dan potensial perpindahan kalor fluida panas dan dingin dari kesetimbangan energi [8],

$$m_{fg} \cdot C_p \cdot (T_x - T_{o\ fg}) = m_{eco} (h_{o\ eco} - h_{i\ eco}) + m_{ev} (h_{o\ ev} - h_{i\ ev}) + m_{sh} (h_{o\ sh} - h_{i\ sh}) \quad (12)$$

dimana :

- m_{fg} = massa aliran *flue gas*, kg/s
- m_{sh} = laju aliran massa di *superheater*, kg/h
- C_p = kalor spesifik gas asap (*flue gas*), kJ/kg.°C
- $T_{i\ fg}$ = Temperatur inlet *flue gas*, °C
- $T_{o\ fg}$ = Temperatur outlet *flue gas*, °C
- $h_{o\ sh}$ = entalpi spesifik pada outlet *superheater*, kJ/kg
- $h_{i\ eco}$ = entalpi spesifik pada inlet *economizer*, kJ/kg

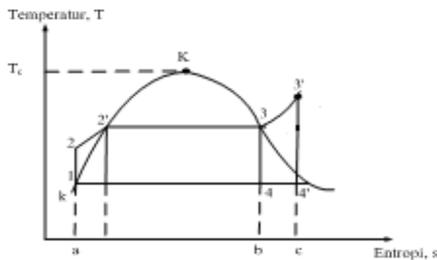
Turbin Uap

Turbin uap pertama yang memberikan dampak positif adalah buatan Charles Parsons tahun 1884. Turbin tersebut turbin reaksi, aliran aksial. Turbin uap terdiri dari HRSG, turbin, kondensor dan pompa air. Uap berfungsi sebagai fluida kerja turbin dihasilkan oleh HRSG, yang mengubah air menjadi uap. Kondisi uap yang dihasilkan antara 15 kg/cm² dan 125⁰ C untuk unit daya rendah sampai 325 kg/cm² dan 650⁰ C untuk unit modern daya tinggi. Uap yang dihasilkan masuk kedalam turbin, dimana energi uap diubah menjadi energi mekanis.

Siklus Rankine

Sistem turbin uap terdiri dari yaitu HRSG, turbin, kondensor dan pompa air. Turbin hanya merupakan salah satu komponen dari suatu sistem tenaga. Uap yang

berfungsi sebagai fluida kerja turbin dihasilkan oleh HRSG yaitu sebuah alat yang berfungsi mengubah air menjadi uap. Tujuan turbin adalah memperoleh manfaat energi fluida kerja yang tersedia, mengubahnya menjadi energi mekanis dengan efisiensi yang maksimal.



Gambar 9. Diagram temperature versus entropi dari siklus rankine [1]

Siklus Rankine terdiri proses berikut :

1. (1-2) proses kompresi isentropik didalam pompa
2. (2-2'-3) proses pemanasan isobarik dalam HRSG
3. (3-4) proses ekspansi isentropik di dalam turbin
4. (4-1) proses kondensasi isobarik di kondensor

Jika pada sistem terdapat pemanas lanjut (superheater) maka proses tersebut akan berlangsung dari titik 3 ke titik 3' dan kemudian proses selanjutnya dari titik 3' ke titik 4' [1],

$$\text{Dimana : } \theta = h + \frac{v^2}{2} + gz \quad (13)$$

e = keadaan akhir (keluar) sistem

i = keadaan awal (masuk) sistem

Apabila prosesnya isentropic dan perubahan energi potensial dari fluida kerjanya dapat diabaikan, maka sistem turbin uap tanpa pemanasan lanjut kerja yang dihasilkan adalah [1]:

$$W_T = h_{i3} - h_{e4}$$

Dimana :

W_T = Kerja yang dihasilkan ekspansi uap pada turbin

h_{i3} = Enthalpi uap masuk turbin

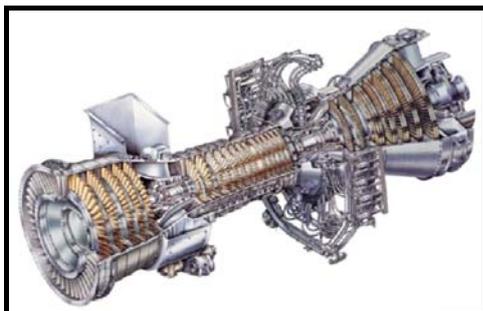
h_{e4} = Enthalpi uap keluar turbin

Sehingga efisiensi termal dari sistem turbin uap [1]:

$$\eta_t = \frac{(h_{i3} - h_{e4})}{h_{i3} - h_{i2}} \quad (14)$$

3. DATA SPESIFIKASI DAN DATA LAPANGAN TURBIN GAS

Spesifikasi Turbin Gas LM 6000



Gambar 10. Turbin Gas LM 6000 PC-Sprint [2]

Data Hasil Survey

Pengambilan data dilakukan pada turbin gas di PT. Meta Epsi Pejebe Power Generation Gunung Megang yang berjumlah 2 unit. Data-data yang diperoleh seperti ditunjukkan pada Tabel 1 di bawah ini:

Tabel 1. Data Kondisi Operasi Turbin Gas Unit 1

No.	Data Operasi	Nilai
1	Temperatur udara atmosfer	82 °F / 301 K
2	Tekanan udara atmosfer	14,20 Psi / 0,98 bar
3	Temperatur udara masuk LPC	81 °F / 300 K
4	Temperatur udara keluar LPC	217 °F / 376 K
5	Temperatur udara masuk HPC	217 °F / 376 K
6	Temperatur udara keluar HPC	974 °F / 796 K
7	Tekanan udara masuk LPC	14,20 Psi / 0,98 bar
8	Tekanan udara keluar LPC	30,9 Psi / 2,13 bar
9	Tekanan udara masuk HPC	30,9 Psi / 2,13 bar
10	Tekanan udara keluar HPC	392,6 Psi / 27,07 bar
11	Temperatur gas masuk HPT	2258 °F / 1510 K
12	Temperatur gas keluar HPT	1600 °F / 1144 K
13	Temperatur gas masuk LPT	1600 °F / 1144 K
14	Tekanan udara masuk HPT	392,6 Psi / 27,07 bar
15	Tekanan udara keluar HPT	96,1 Psi / 6,63 bar
16	Tekanan udara masuk LPT	96,1 Psi / 6,63 bar
17	Tekanan gas keluar turbin	14,20 Psi / 0,98 bar
18	Temperatur gas buang	850 °F / 728 K
19	Laju aliran bahan bakar gas alam	4,38 lbs/s (1,987 kg/s)
20	Laju aliran Sprint sistem	18,3 GPM (1,15 kg/s)
21	Laju aliran udara	270,8 lbs/s (122,85 kg/s)
22	Laju aliran massa dikompresor	124 kg/s
23	Low Pressure RPM	3.622 rpm
24	High Pressure RPM	10.428 rpm
25	Gross Heating Value gas alam	1156,78 BTU/SCF 65.148,56 kJ/kg
26	Daya poros efektif	40,5 MW

Hasil Perhitungan

Perhitungan energi dan kalor pada Turbin Gas 1 dan 2 serta perhitungan daya siklus gabungan ditunjukkan pada Tabel 2 sampai dengan Tabel 5.

Tabel 2. Perhitungan Energi Pada Turbin Gas 1

Sistem	Energi (kJ/s)
Kompresor Tekanan Rendah	9.488,74
Kompresor Tekanan Tinggi	53.000,25
Ruang Bakar	116.804,74
Turbin Tekanan Tinggi	60.272,18
Turbin Tekanan Rendah	53.027,93

Tabel 3. Perhitungan Energi Pada Turbin Gas 2

Sistem	Energi (kJ/s)
Kompresor Tekanan Rendah	9.613,59
Kompresor Tekanan Tinggi	52.884,45
Ruang Bakar	116.804,74
Turbin Tekanan Tinggi	53.024,14
Turbin Tekanan Rendah	60.267,87

Tabel 4. Perhitungan Kalor Pada Turbin Gas 2

Sistem	Kalor (kJ/s)
Economizer	14.992,88
Evaporator	44.292,09
Superheater	10.651,25

Tabel 5. Perhitungan Daya Dengan Siklus gabungan

Turbin	Daya (kW)
Turbin Gas 1	50.783,44
Turbin Gas 2	50.654,29
Turbin Uap	16.738,79

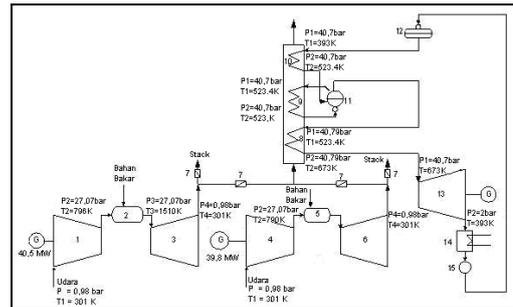
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Turbin Gas

Turbin gas yang digunakan turbin gas jenis GE LM 6000PC Sprint buatan General Electric. Turbin ini memiliki 2 poros, yaitu 1 poros putaran tinggi dan 1 poros putaran rendah. Poros putaran tinggi memiliki kecepatan 10.394 rpm, merupakan putaran dari turbin tekanan tinggi menggerakkan kompresor tekanan tinggi dengan rasio kompresi 12:1. Poros putaran rendah berkecepatan 3.643 rpm, merupakan putaran turbin tekanan rendah menggerakkan kompresor tekanan rendah mempunyai rasio kompresi 2,4:1 dan menggerakkan generator. Daya yang dihasilkan turbin gas 50,7 MW dan 50,6 MW. Siklus gabungan seperti ditunjukkan pada Gambar 11 merupakan penggabungan dua/lebih siklus termal menjadi satu sistem pembangkit listrik. Sistem siklus gabungan terdiri sejumlah komponen mesin penggerak, generator, dan HRSG

tergabung menjadi suatu integrasi.

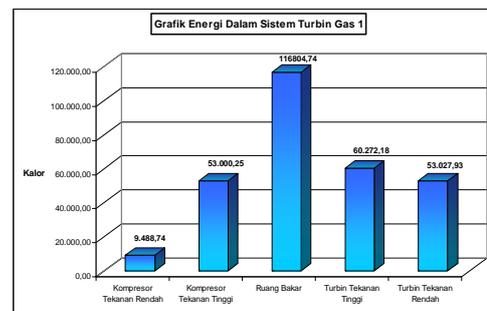
Pada kajian ini, pembangkit listrik ini menggunakan sistem siklus gabungan tanpa pembakaran tambahan dengan 2 unit turbin gas, 1 unit HRSG dan 1 unit turbin uap tekanan balik. Sistem ini memanfaatkan panas gas buang turbin gas yang memiliki suhu 455 °C. Panas dari gas buang dimanfaatkan untuk memanaskan air di dalam HRSG. Turbin uap yang digunakan turbin uap tekanan balik dengan tekanan keluar turbin 2 bar. Daya yang dihasilkan turbin uap 17,3 MW.



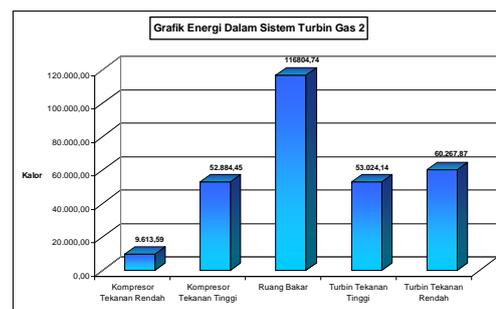
Gambar 11. Diagram Siklus Gabungan

Analisa Energi

Dalam analisa energi pada masing-masing turbin gas, energi di kompresor merupakan kerja yang dilakukan untuk menggerakkan kompresor agar terjadi proses kompresi. Sedangkan energi pada turbin berasal dari kerja turbin yang dihasilkan karena terjadi proses ekspansi yang terjadi di dalam turbin. Jumlah energi yang dihasilkan pada masing-masing turbin gas dapat dilihat di grafik Gambar 12 dan Gambar 13.



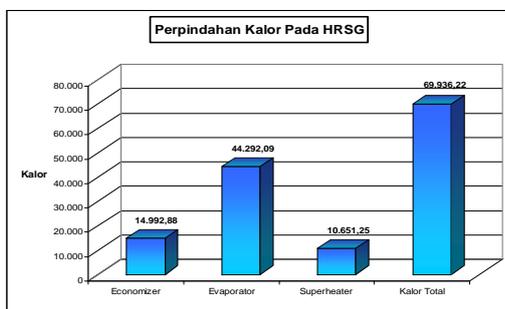
Gambar 12. Grafik Energi dalam Sistem Turbin Gas 1



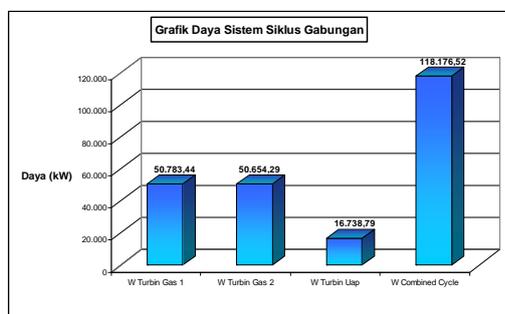
Gambar 13. Grafik Energi Dalam Sistem Turbin Gas 2

Perhitungan Kalor Pada HRSG

Pada perhitungan kalor di HRSG, panas dari gas buang turbin gas keluar memiliki temperatur yang sama yaitu 455^o digunakan untuk memanaskan HRSG. Di komponen HRSG terjadi pembentukan uap, pada tahap pertama dari deaerator temperatur pemanasan akan naik sampai 120 °C masuk ke economizer, dan terbentuk uap air. Pada evaporator, uap basah dipanaskan lagi pada suhu 250,4 °C dan didapat uap jenuh, pemanasan dilanjutkan di komponen superheater pada suhu 400°C menjadi uap panas lanjut. Dengan laju aliran uap sebesar 25,84 kg/s dan tekanan operasi HRSG 4 MPa, uap jenuh diubah menjadi uap panas lanjut yang digunakan sebagai penggerak turbin uap. Perpindahan kalor di HRSG dilihat pada Gambar 14 di bawah ini.



Gambar 14. Grafik Perpindahan Kalor di HRSG



Gambar 15. Grafik Energi di Sistem Siklus Gabungan

Dari Gambar 15, dapat dilihat grafik energi dalam sistem siklus gabungan. Jika dengan menggunakan sistem konvensional daya yang didapat sekitar 101.437,73 kW. Dengan sistem siklus gabungan didapat kenaikan daya sekitar 16.738,79 kW. Daya yang diperoleh sistem siklus gabungan 118.176,52 kW.

Dengan adanya peningkatan daya yang dihasilkan, maka sistem siklus gabungan ini daya yang dihasilkan lebih besar daripada menggunakan sistem konvensional sehingga menguntungkan pihak industri maupun perusahaan listrik yang mengembangkan sistem siklus gabungan. Karena itu sistem siklus gabungan layak dikembangkan guna menunjang kebutuhan listrik baik oleh industri maupun segi komersialisasi.

Analisa Ekonomi

Karena dengan sistem konvensional pemakaian bahan bakar 14,27 ton/h maka dalam bahan bakar yang digunakan adalah perhari adalah 342,8 ton/hari. Daya listrik yang dihasilkan pembangkit listrik dalam sehari adalah 8.762.688 MW. Dengan sistem siklus gabungan daya listrik yang dihasilkan 10.212.480 MW per hari. Dan efisiensi penggunaan bahan bakar 14,2 % atau penghematan bahan bakar seitar 48,63 ton/hari. Dilihat dari daya yang dihasilkan sistem siklus gabungan dengan jumlah bahan bakar yang sama jika menggunakan turbin dengan sistem konvensional, maka sistem siklus gabungan layak digunakan oleh pembangkit listrik, juga industri lain untuk menaikkan jumlah daya yang dihasilkan oleh turbin gas tersebut.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan Analisis Sistem Siklus Gabungan Pembangkit Listrik Turbin Gas Di PT. META EPSI PEJEBE POWER GENERATION dapat disimpulkan :

1. Daya yang dihasilkan oleh masing-masing turbin gas adalah 50,8 MW dan 50,6 MW.
2. Nilai kalor pada *economizer* 14.992,88 kJ/s, pada evaporator nilai kalornya 44.292,09 kJ/s dan pada superheater adalah 10.651,25kJ/s.
3. Daya yang dihasilkan turbin uap 16,7 MW.
4. Daya yang dihasilkan dengan menggunakan sistem siklus gabungan adalah 118,2 MW.
5. Penghematan pemakaian bahan bakar adalah 14,2% atau sekitar 48,63 ton/hari.

DAFTAR PUSTAKA

1. Arismunandar, Wiranto, 2004, *Penggerak Mula Turbin*, Indonesia, Penerbit ITB
2. Basic Operating Course LM 6000 Package Familiarization, General Electric Company, 2006.
3. Bathie, William W., 1996, *Fundamentals of Gas Turbine*. New York : McGraw-Hill, Inc.
4. Cengel, Yunus A., "*Thermodynamics an Engineering Approach*", 5th Edition., McGraw-Hill Inc., New York
5. Dietzel, Fritz. 1980 *Turbin, Pompa Dan Kompresor*. Indonesia : Erlangga.
6. Kehlhofer, Ralf. 1997. *Siklus gabungan Gas And Steam Turbine Power Plants*. Oklahoma : PennWell Publishing Company.
7. Korobitsyn, M.A. 1998. *New And Advance Energy Conversion Technologies. Analysis Of Cogeneration*,



Combined And Integrated Cycles. Amsterdam :
University of Twente.

8. Li, Kam W And Priddy, Paul A. 1985 *Power Plant System Design* Canada : John Wiley & Sons, Inc.
9. Shlyakhin, P. 1993. *Turbin Uap.* Indonesia : Erlangga.