

# KOGENERASI

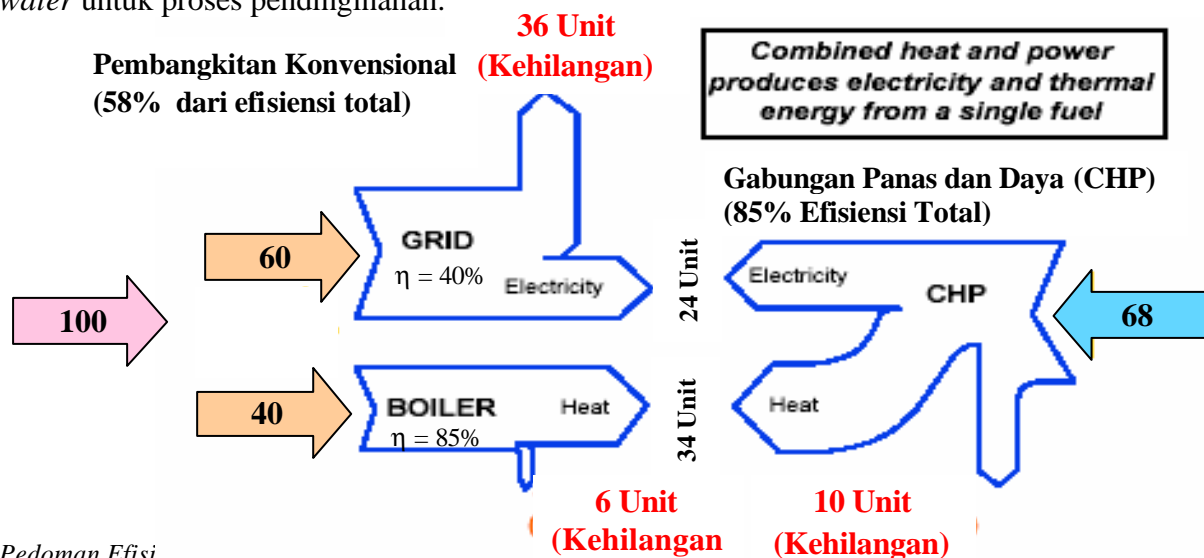
<b>1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
<b>2. JENIS-JENIS SISTIM KOGENERASI.....</b>	<b>2</b>
<b>3. PENGKAJIAN SISTIM KOGENERASI.....</b>	<b>12</b>
<b>4. PELUANG EFISIENSI ENERGI.....</b>	<b>15</b>
<b>5. DAFTAR PERIKSA OPSL.....</b>	<b>16</b>
<b>6. LEMBAR KERJA .....</b>	<b>16</b>
<b>7. REFERENSI.....</b>	<b>18</b>

## 1. PENDAHULUAN

Bagian ini memberi gambaran ringkas mengenai ciri-ciri utama sistim kogenerasi atau sistim Kombinasi Panas & Daya (*Combined Heat & Power/ CHP*)

### 1.1 Apakah Kogenerasi?

Sistim kogenerasi adalah serangkaian atau pembangkitan secara bersamaan beberapa bentuk energi yang berguna (biasanya mekanikan dan termal) dalam satu sistim yang terintegrasi. Sistim CHP terdiri dari sejumlah komponen individu – mesin penggerak (mesin panas), generator, pemanfaatan kembali panas, dan sambungan listrik – tergabung menjadi suatu integrasi. Jenis peralatan yang menggerakkan seluruh sistim (mesin penggerak) mengidentifikasi secara khusus sistim CHPnya. Mesin penggerak untuk sistim CHP terdiri dari mesin *reciprocating*, pembakaran atau turbin gas, turbin uap, turbin mikro dan sel bahan bakar. Mesin penggerak ini dapat membakar berbagai bahan bakar, yaitu gas alam, batubara, minyak bakar, dan bahan bakar alternatif untuk memproduksi daya poros atau energi mekanis. Meskipun umumnya energi mekanis dari mesin penggerak digunakan untuk menggerakkan generator untuk membangkitkan listrik, tetapi dapat juga digunakan untuk menggerakkan peralatan yang bergerak seperti kompresor, pompa, dan fan. Energi termal dari sistim dapat digunakan untuk penerapan langsung dalam proses atau tidak langsung untuk memproduksi steam, air panas, udara panas untuk pengeringan, atau air dingin/ *chilled water* untuk proses pendinginan.



**Gambar 1. Efisiensi Energi Advantage Pada Sistem Kogenerasi (UNESCAP, 2000)**

Gambar 1 menunjukkan efisiensi energi canggih CHP dibandingkan dengan stasiun pusat pembangkit listrik konvensional dan pembangkit boiler. Sistem CHP hanya menggunakan energi tiga perempat bagian dari energi yang digunakan jika sistem panas dan daya terpisah. Penurunan konsumsi bahan bakar primer ini merupakan keuntungan utama sistem CHP, karena jika pembakaran lebih efisien atau kebutuhan bahan bakar lebih sedikit, berarti emisi akan lebih sedikit untuk hasil yang sama.

## 1.2 Keuntungan Kogenerasi

Seperti sudah digambarkan diatas, keuntungan penggunaan sistem kogenerasi adalah sebagai berikut:

- Meningkatkan efisiensi konversi energi dan penggunaannya.
- Emisi lebih rendah terhadap lingkungan, khususnya CO<sub>2</sub>, gas rumah kaca utama.
- Dalam beberapa kasus, digunakan bahan bakar biomassa dan beberapa limbah seperti limbah pengolahan minyak bumi, limbah proses dan limbah pertanian (dengan digester anaerobik atau gasifikasi). Bahan ini akan menjadi bahan bakar pada sistem kogenerasi, meningkatkan efektivitas biaya dan mengurangi tempat pembuangan limbah.
- Penghematan biaya yang besar menjadikan industri atau sektor komersial lebih kompetitif dan juga dapat memberikan tambahan panas untuk pengguna domestik.
- Memberikan kesempatan lebih lanjut untuk membangkitkan listrik lokal yang didesain sesuai kebutuhan konsumen lokal dengan efisiensi tinggi, menghindari kehilangan transmisi dan meningkatkan fleksibilitas pada sistem penggunaan. Hal ini khususnya untuk penggunaan bahan bakar gas alam.
- Suatu kesempatan untuk meningkatkan diversifikasi *plant* pembangkit, dan menjadikan persaingan pembangkitan. Kogenerasi menyediakan sesuatu kendaraan terpenting untuk promosi pasar energi yang liberal.

## 2. JENIS-JENIS SISTEM KOGENERASI

Bagian ini mencakup berbagai jenis sistem kogenerasi: sistem kogenerasi turbin uap, sistem kogenerasi turbin gas, dan sistem kogenerasi mesin *reciprocating*. Dalam bagian ini juga menyangkut klasifikasi sistem kogenerasi atas dasar urutan energi yang digunakan.

### 2.1 Sistem Kogenerasi Turbin Uap

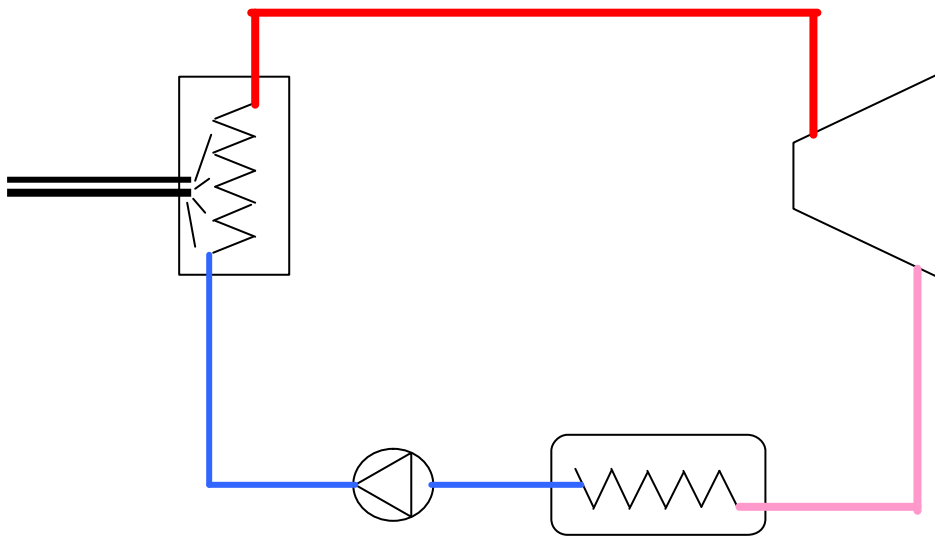
Turbin uap merupakan salah satu teknologi mesin penggerak yang multi guna dan tertua yang masih diproduksi secara umum. Pembangkitan energi dengan menggunakan turbin uap telah berlangsung sekitar 100 tahun, ketika alat tersebut menggantikan mesin steam *reciprocating* karena efisiensinya yang tinggi dan biayanya yang murah. Kapasitas turbin uap dapat berkisar dari 50 kW hingga ratusan MWs untuk *plant* utilitas energi yang besar. Turbin uap digunakan secara luas untuk penerapan gabungan panas dan daya (CHP). Siklus termodinamika untuk turbin uap merupakan siklus Rankine. Siklus merupakan dasar bagi stasiun pembangkitan daya konvensional dan terdiri dari sumber panas (*boiler*) yang mengubah air menjadi steam tekanan tinggi. Dalam siklus steam, air pertama-tama dipompa ke tekanan sedang hingga tinggi, kemudian dipanaskan hingga suhu didih yang sesuai dengan tekanannya, dididihkan (dipanaskan dari cair hingga uap), dan kemudian biasanya diberikan

panas berlebih/*superheated* (dipanaskan hingga suhu diatas titik didih). Turbin multi tahap mengekspansi steam bertekanan sampai ke tekanan rendah dan steam kemudian dikeluarkan ke kondensator pengembun pada kondisi vakum atau menuju sistim distribusi suhu menengah yang mengirimkan steam ke penggunaan industri atau komersial. Kondensat dari kondensator atau dari sistim penggunaan steam dikembalikan ke pompa air umpan untuk keberlanjutan siklus.

Dua jenis turbin uap yang banyak digunakan adalah jenis tekanan balik dan ekstraksi-kondensasi. Pemilihan diantara keduanya sangat tergantung pada besarnya panas dan daya, kualitas panas dan faktor ekonomi. Titik ekstraksi steam dari turbin dapat lebih dari satu, tergantung pada tingkat suhu dari panas yang diperlukan oleh proses.

### 2.1.1 Turbin Steam Tekanan Balik

Turbin steam tekanan balik merupakan rancangan yang paling sederhana. Steam keluar turbin pada tekanan yang lebih tinggi atau paling tidak sama dengan tekanan atmosfer, yang tergantung pada kebutuhan beban panas. Hal ini yang menyebabkan digunakannya istilah tekanan balik. Dengan cara ini juga memungkinkan mengekstraksi steam dari tahap *intermediate* turbin uap, pada suhu dan tekanan yang sesuai dengan beban panas. Setelah keluar dari turbin, steam diumpankan ke beban, dimana steam ini akan melepaskan panas dan kemudian diembunkan. Embun kondensat kembali ke sistim dengan laju alir yang dapat lebih rendah dari laju alir steam, jika steam digunakan dalam proses atau jika terdapat kehilangan-kehilangan sepanjang jalur pipa. Air *make-up* digunakan untuk menjaga neraca bahan.



**Gambar 2. Turbin Steam Tekanan Balik**

Sistim tekanan balik memiliki keuntungan-keuntungan sebagai berikut:

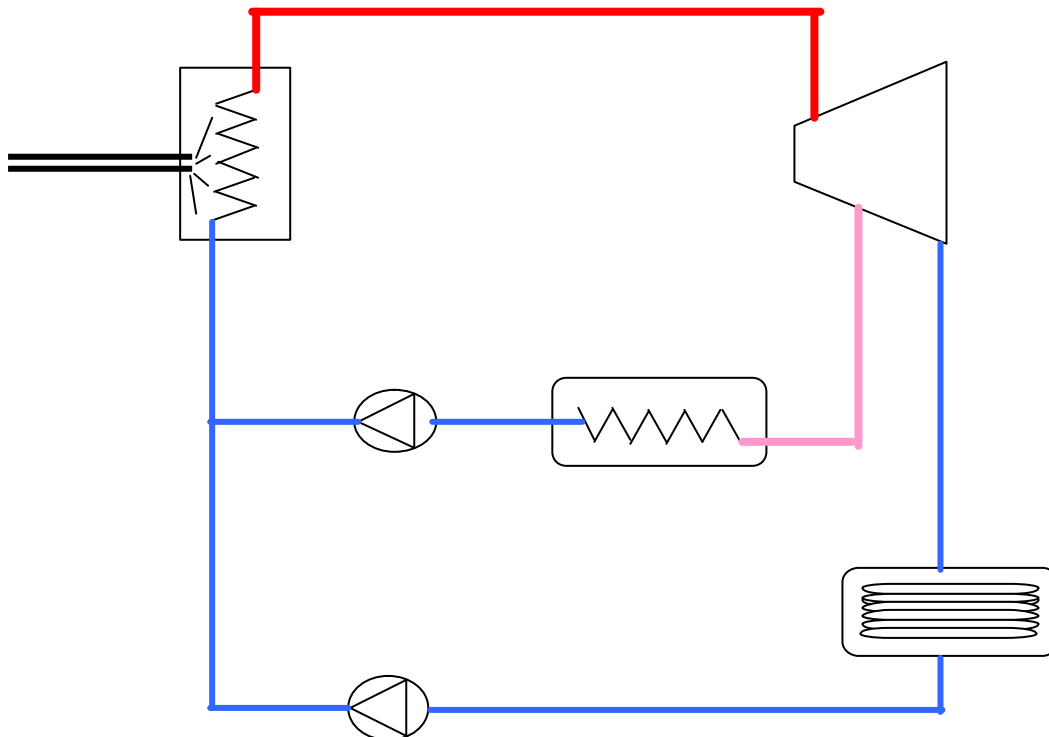
- Rancangannya sederhana dengan hanya beberapa komponen
- Biaya tahapan tekanan rendah yang mahal dihindarkan.
- Modalnya rendah
- Kebutuhan air pendingin berkurang atau bahkan tidak ada.
- Efisiensi totalnya tinggi, sebab tidak terdapat pembuangan panas ke lingkungan yang melalui kondensator.

Sistim tekanan balik memiliki kerugian-kerugian sebagai berikut:

- Turbin uap lebih besar untuk keluaran energi yang sama, sebab turbin ini beroperasi pada perbedaan entalpi steam yang lebih rendah.
- Laju alir massa steam yang menuju turbin tergantung pada beban termis. Sebagai akibatnya, listrik yang dihasilkan oleh steam dikendalikan oleh beban panas, yang menghasilkan sedikit atau tidak ada fleksibilitas pada penyesuaian langsung keluaran listrik terhadap beban listrik. Oleh 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 cara membuang steam secara langsung ke atmosfer, namun cara ini sangat tidak efisien. Hal ini akan mengakibatkan dihasilkannya limbah air boiler yang sudah diolah dan, kemungkinan besar, nilai ekonomis dan kinerja energinya yang buruk

### 2.1.2 Ekstraksi Kondensasi Turbin Uap

Pada sistim ini, steam untuk beban panas diperoleh dengan cara ekstraksi dari satu atau lebih tahap *intermediate* pada tekanan dan suhu yang sesuai. Steam yang tersisa dibuang ke tekanan kondensor, yang besarnya 0,05 bar dengan suhu sekitar 33 °C, sehingga tidak memungkinkan untuk dimanfaatkan karena suhunya sangat rendah. Sebagai akibatnya, steam ini dibuang ke atmosfer. Jika dibandingkan dengan sistim tekanan balik, turbin jenis kondensasi memiliki biaya investasi yang lebih tinggi dan, umumnya, efisiensi totalnya lebih rendah. Namun demikian, untuk tingkatan tertentu, turbin ini dapat mengendalikan energi listrik yang tidak tergantung pada beban panas dengan cara pengaturan laju alir steam yang tepat melalui turbin.



Gambar 3. Turbin Uap Ekstraksi Kondensasi



## 2.2 Turbin Gas Sistem Kogenerasi

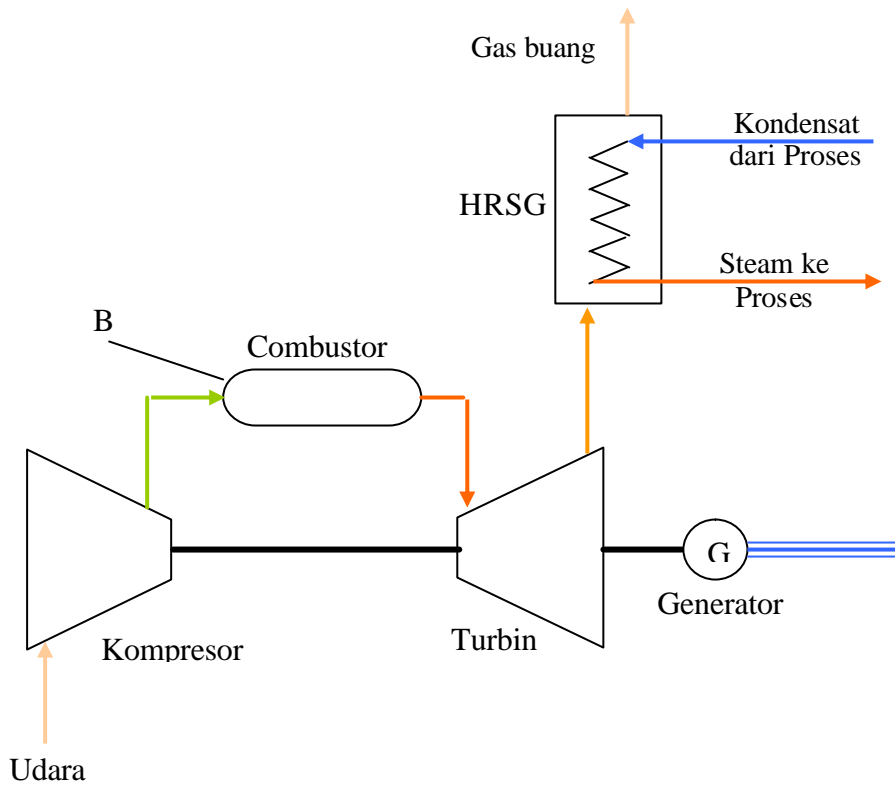
Sistem turbin gas beroperasi pada siklus termodinamika yang dikenal dengan siklus Brayton. Pada siklus Brayton, udara atmosfer dikompresi, dipanaskan, diekspansikan, dengan kemudian berlebih yang dihasilkan oleh turbin atau ekspander yang dipakai oleh kompresor digunakan untuk pembangkitan energi.

Turbin gas sistem kogenerasi dapat menghasilkan seluruh atau sebagian permintaan energi setempat, dan energi yang dilepas pada suhu tinggi pada cerobong pengeluaran dapat dimanfaatkan kembali untuk berbagai penggunaan pemanasan dan pendinginan (lihat Gambar 4). Walau gas alam sudah hampir umum digunakan, bahan bakar lain seperti bahan bakar minyak ringan atau diesel dapat juga dipakai. Ukuran turbin gas yang digunakan bervariasi dari beberapa MW hingga sekitar 100 MW.

Turbin gas kogenerasi memiliki pengalaman perkembangan yang tercepat akhir-akhir ini karena besarnya ketersediaan gas alam, kemajuan teknologi yang cepat, penurunan biaya pemasangan yang cukup berarti, dan kinerja lingkungan yang lebih baik. Selanjutnya, masa persiapan untuk perkembangan suatu proyek lebih pendek dan peralatan dapat dikirim dengan cara modul. Turbin gas memiliki waktu *start-up* yang pendek dan memberi fleksibilitas operasi yang berubah-ubah. Walau turbin tersebut memiliki panas rendah terhadap efisiensi energi, panas yang dapat dimanfaatkan kembali pada suhu tinggi lebih banyak. Jika keluaran panas kurang dari yang diperlukan oleh pengguna, maka memungkinkan untuk memiliki pembakaran tambahan gas alam dengan cara mencampurkan bahan bakar tambahan terhadap gas buang yang masih kaya dengan oksigen untuk meningkatkan keluaran panas yang lebih efisien.

### 2.2.1 Turbin gas siklus terbuka sistem kogenerasi

Hampir seluruh sistem turbin gas yang tersedia saat ini, pada berbagai sektor penggunaan, beroperasi pada siklus Brayton terbuka (juga dikenal dengan siklus Joule bila tidak dapatbaliknya diabaikan) dimana kompresor mengambil udara dari atmosfer dan membawanya pada tekanan yang lebih tinggi ke pembakar. Suhu udara juga meningkat karena kompresi. Unit yang lebih tua dan lebih kecil beroperasi pada perbandingan tekanan sekitar 15:1, sementara unit yang lebih baru dan lebih besar beroperasi pada perbandingan tekanan mendekati 30:1.



**Gambar 4. Sistem Turbin Gas Kogenerasi Siklus Terbuka**

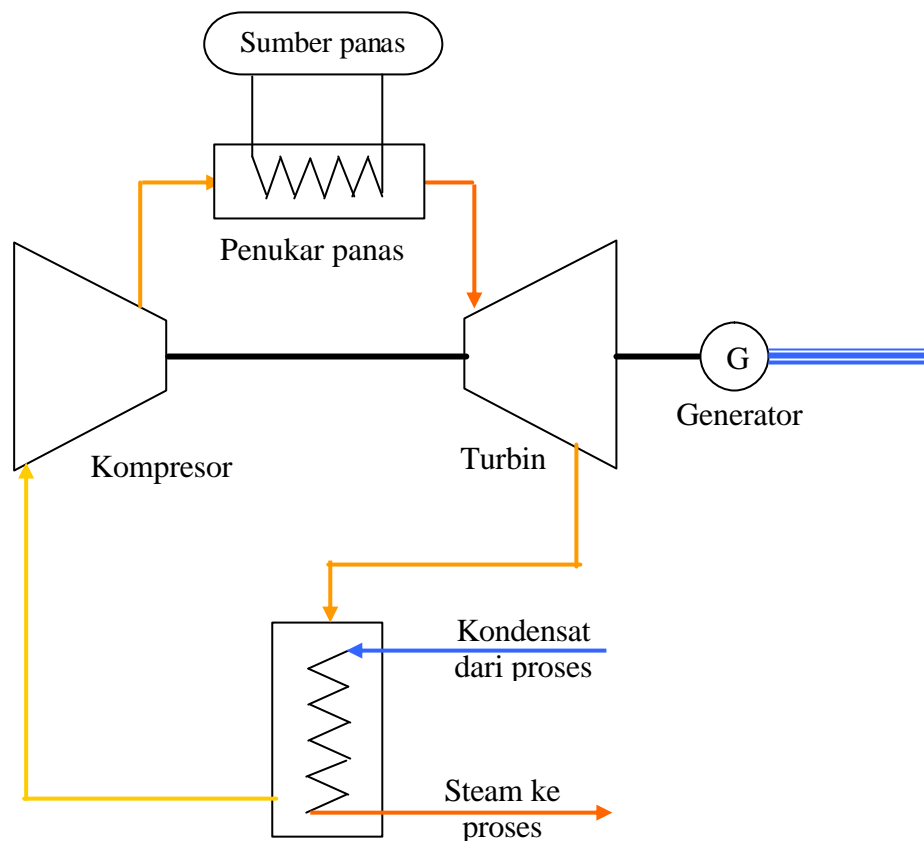
Udara dikirimkan melalui sebuah *diffuser* ke ruang pembakaran yang bertekanan konstan, dimana bahan bakar diinjeksi dan dibakar. *Diffuser* menurunkan kecepatan udara ke nilai yang dapat diterima dalam pembakar. Terdapat penurunan tekanan/ *pressure drop* di dalam pembakar sekitar 1,2%. Pembakaran berlangsung dengan udara berlebih. Gas buang keluar pembakar pada suhu tinggi dengan konsentrasi oksigen sampai 15-16%. Semakin tinggi suhu pada siklus ini, akan semakin tinggi efisiensi siklusnya. Batas atasnya ditentukan daya tahan material turbin terhadap suhu, juga oleh efisiensi sudu-sudu pendingin. Batasan suhu pada teknologi terbaru adalah sekitar 1300°C.

Gas buang yang bersuhu dan bertekanan tinggi ini menuju turbin gas menghasilkan kerja mekanis untuk menggerakkan kompresor dan beban (generator listrik). Gas buang meninggalkan turbin pada suhu yang cukup besar (450-600 °C), yang ideal untuk dimanfaatkan kembali panas yang bersuhu tinggi. Untuk pemanfaatan yang lebih efisien, dipengaruhi oleh boiler pemanfaat kembali panas yang bertekanan tunggal atau ganda.

Steam yang dihasilkan dapat memiliki tekanan dan suhu yang tinggi, yang menjadikannya cocok tidak hanya untuk proses termal saja namun juga untuk menggerakkan turbin uap sehingga menghasilkan energi tambahan.

### 2.2.2 Sistem kogenerasi turbin gas siklus tertutup

Dalam sistem siklus tertutup, fluida kerja (biasanya gas helium atau udara) bersirkulasi dalam suatu sirkuit tertutup. Fluida ini dipanaskan dalam suatu penukar panas sebelum masuk menuju turbin, dan didinginkan setelah keluar turbin dan melepaskan panas yang berguna. Sehingga maka fluida kerjanya bersih dan tidak menyebabkan korosi ataupun erosi.



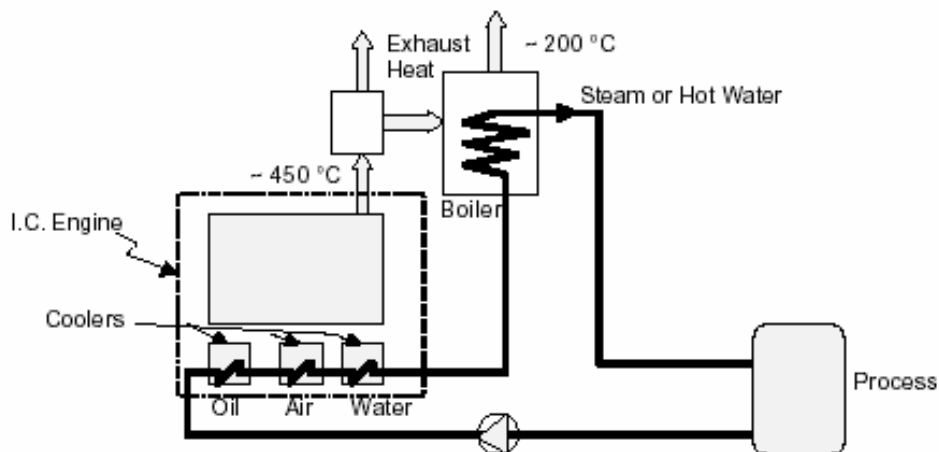
**Gambar 5: Sistim kogenerasi turbin gas siklus tertutup**

Sumber panas dapat berasal dari pembakaran eksternal berbagai bahan bakar. Juga, dapat digunakan energi nuklir atau energi matahari.

### 2.3 Sistim Kogenerasi Mesin *Reciprocating*

Mesin-mesin *reciprocating* cocok untuk berbagai penggunaan pembangkitan yang terdistribusi, industri, komersial, dan fasilitas institusional untuk pembangkitan daya dan CHP. Mesin *reciprocating* mudah menyalakannya, mengikuti beban dengan baik, memiliki efisiensi beban sebagian yang bagus, dan umumnya memiliki kehandalan yang tinggi. Dalam beberapa kasus, unit mesin *multiple reciprocating* meningkatkan kapasitas total. Mesin *reciprocating* memiliki efisiensi listrik lebih tinggi dibanding turbin gas dengan ukuran yang sebanding, dengan demikian merendahkan biaya operasi yang berhubungan dengan bahan bakar. Disamping itu, biaya awal genset mesin *reciprocating* umumnya lebih rendah dari genset turbin gas hingga ukuran 3-5 MW. Biaya perawatan mesin *reciprocating* umumnya lebih tinggi dari turbin gas, namun perawatan kadang dapat ditangani oleh karyawan setempat atau disediakan oleh organisasi layanan setempat.

Potensi penerapan pembangkitan yang terdistribusi untuk mesin *reciprocating* terdiri dari *standby*, pemangkasan beban puncak, penyangga grid, dan penerapan CHP dimana diperlukan air panas, steam tekanan rendah, atau limbah absorpsi panas pembakaran pada pendingin. Mesin *reciprocating* juga digunakan secara luas sebagai penggerak mekanik langsung dalam berbagai penerapan seperti pompa air, kompresi udara dan gas dan pendinginan.



Gambar 6: Sistim Kogenerasi Mesin *Reciprocating* (UNESCAP, 2000)

Sementara penggunaan mesin *reciprocating* tumbuh di berbagai penerapan pembangkitan yang terdistribusi, penerapan pembangkitan yang paling umum di lokasi untuk mesin SI gas alam secara tradisional adalah CHP, dan kecenderungan ini nampaknya akan berlanjut terus. Segi ekonomi dari mesin gas alam pada penerapan pemangkitan di tempat diperbaiki dengan penggunaan energi panas yang efektif dari energi panas yang terkandung dalam sistim gas buang dan pendinginan, yang biasanya sebesar 60 hingga 70% dari energi bahan bakar masuk.

Terdapat empat sumber limbah panas yang dapat digunakan dari mesin *reciprocating*: gas buang, air pendingin jaket mesin, air pendingin minyak pelumas, dan pendingin *turbocharger*. Panas yang dimanfaatkan umumnya dalam bentuk air panas atau steam tekanan rendah (<30 psig). Suhu gas buang yang tinggi dapat menghasilkan steam tekanan sedang (hingga sekitar 150 psig), namun gas buang mengandung hanya sekitar separuh dari energi panas yang tersedia dari mesin *reciprocating*. Beberapa penerapan CHP di industri menggunakan mesin gas buang secara langsung untuk proses pengeringan. Pada umumnya, air panas dan steam tekanan rendah yang dihasilkan oleh mesin *reciprocating* sistim CHP cocok untuk kebutuhan posess bersuhu rendah, pemanasan ruangan, pemanasan air kran, dan untuk menggerakkan pendingin absorpsi penyedia air dingin, AC, atau pendinginan.

Tabel 1. Parameter kinerja kogenerasi (diambil dari: Komisi Energi Kalifornia, 1982)

Mesin Penggerak dalam Paket Kogenerasi	Kisaran Nominal (Listrik)	Laju Panas Pembangkitan Listrik (kcal / kWh)	Efisiensi, %		
			Konversi Listrik	Pemanfaatan Panas	Kogenerasi Keseluruhan
Mesin <i>Reciprocating</i> yang Lebih Kecil	10 – 500 kW	2650 - 6300	20-32	50	74-82
Mesin <i>Reciprocating</i> yang Lebih Besar	500 – 3000 kW	2400 - 3275	26-36	50	76-86
Mesin Diesel	10-3000 kW	2770 - 3775	23-38	50	73-88

Turbin Gas yang Lebih Kecil	800-10000 kW	2770-3525	24-31	50	74-81
Turbin Gas yang Lebih Besar	10-20 MW	2770-3275	26-31	50	78-81
Turbin Uap	10-100 MW	2520-5040	17-34	-	-

## 2.4 Klasifikasi Lain Sistem Kogenerasi

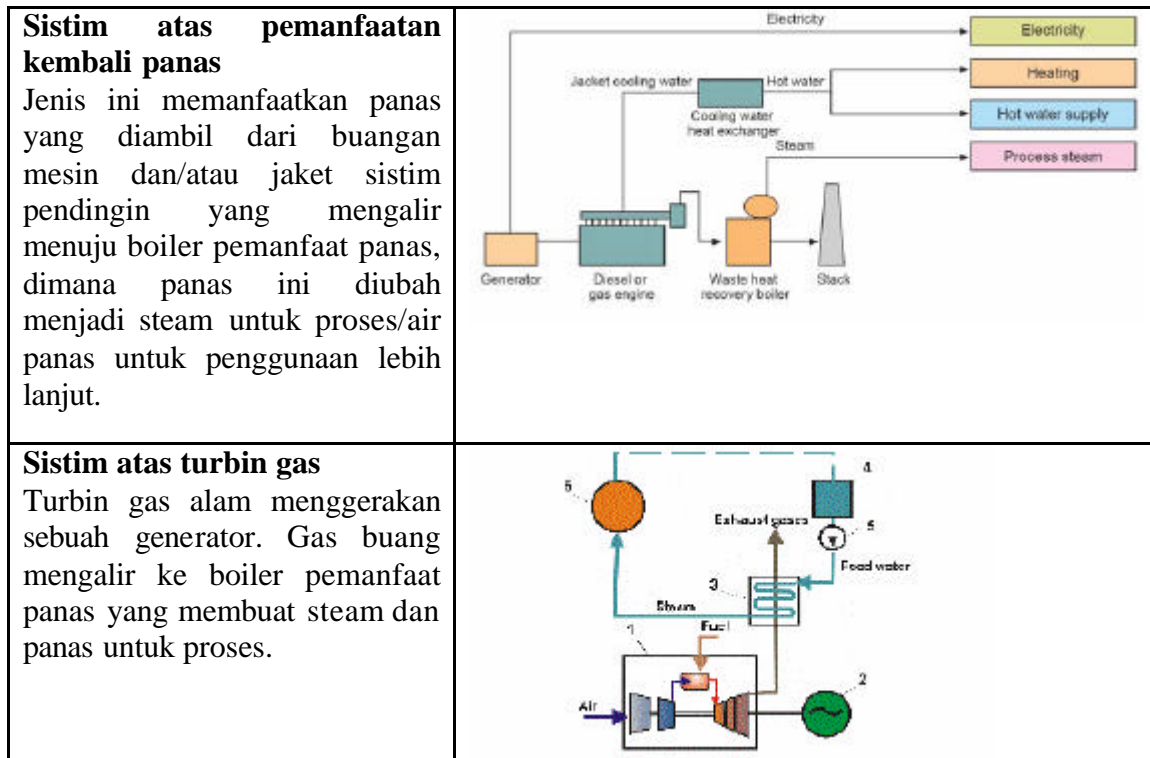
Sistem kogenerasi biasanya diklasifikasikan menurut urutan penggunaan energi dan skema operasi yang diambil. Pada sistem kogenerasi dasar ini dapat diklasifikasikan sebagai siklus atas atau bawah.

### 2.4.1 Siklus Atas

Dalam siklus atas, bahan bakar yang dipasok digunakan untuk memproduksi daya terlebih dahulu dan kemudian energi panas, yang merupakan produk samping siklus dan digunakan untuk memenuhi panas proses atau permintaan panas lainnya. Kogenerasi siklus atas digunakan secara luas dan merupakan metode kogenerasi yang paling populer.

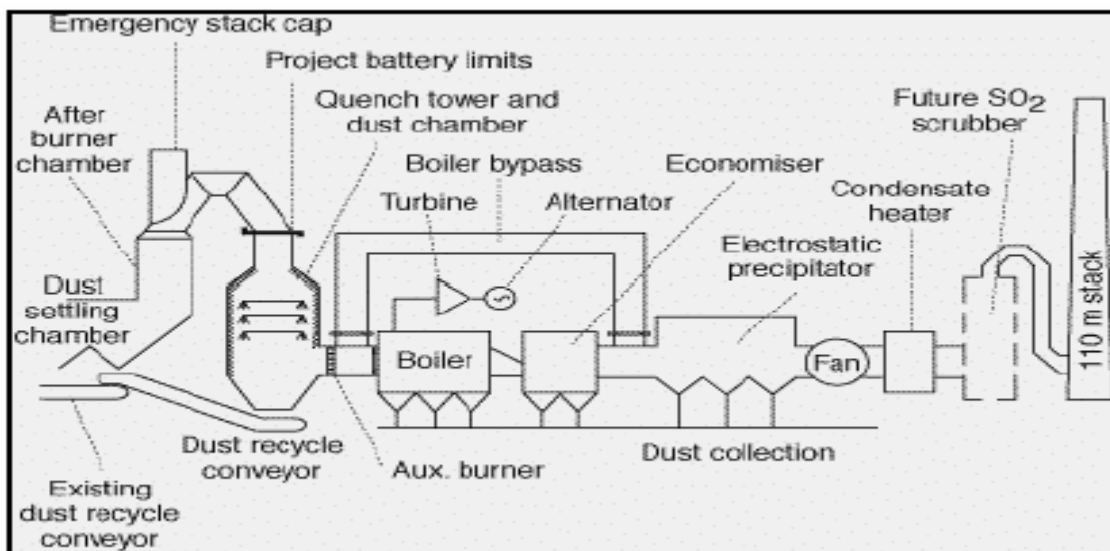
**Tabel 2. Empat jenis sistem kogenerasi siklus atas** (gambar dari Departement Energi, Australia)

<p><b>Sistem atas siklus kombinasi</b> Sebuah turbin gas atau mesin diesel memproduksi listrik atau daya mekanis diikuti oleh boiler pemanfaat panas untuk menghasilkan steam untuk menggerakkan turbin uap sekunder.</p>	
<p><b>Sistem atas turbin steam</b> Jenis kedua dari sistem membakar bahan bakar (jenis apapun) untuk menghasilkan steam tekanan tinggi yang kemudian melewati turbin uap untuk menghasilkan daya dengan buangan steam dari proses yang bertekanan rendah.</p>	



### 2.4.2 Siklus bawah

Dalam siklus bawah, bahan bakar primer memproduksi energi panas suhu tinggi dan panas yang keluar dari proses digunakan untuk membangkitkan daya melalui boiler pemanfaat kembali dan sebuah generator turbin. Siklus bawah cocok untuk proses manufaktur yang memerlukan panas pada suhu tinggi dalam tungku dan kiln, yang membuang panas pada suhu tinggi. Areal penerapannya termasuk industri semen, baja, keramik, gas, dan petrokimia. Plant siklus bawah kurang umum daripada siklus atas. Gambar 9 menggambarkan siklus bawah dimana bahan bakar dibakar dalam *furnace* untuk menghasilkan *rutile* sintetik. Limbah gas yang keluar dari *furnace* digunakan dalam *boiler* untuk menghasilkan *steam*, yang menggerakkan turbin untuk menghasilkan listrik.



Gambar 7, Sistim kogenerasi siklus bawah (Biro Efisiensi Energi, 2004)

### 3. PENGKAJIAN SISTIM KOGENERASI

#### 3.1 Definisi & Kinerja

##### *Kinerja Pabrik Keseluruhan*

- Laju Panas Pabrik Keseluruhan (kKal/kWh)

$$\frac{M_s \times (h_s - h_w)}{\text{Energi Keluar (kW)}}$$

Dimana,

- Ms = Laju Alir Massa Steam (kg/jam)
- hs = Entalpi Steam (kKal/kg)
- hw = Entalpi Air Umpan (kKal/kg)

- Laju Bahan Bakar Pabrik Keseluruhan (kg/kWh)

$$\frac{\text{Pemakaian Bahanbakar}^* (\text{kg/ jam})}{\text{Energi Keluar (kW)}}$$

- Total Bahan Bakar untuk Turbin& Steam

##### *Kinerja turbin uap*

- Efisiensi Turbin uap (%):

$$\frac{\text{Penurunan Entalpi Aktual yang melintasi Turbin (kKal/kg)}}{\text{Penurunan Entalpi Isentropik yang melintasi Turbin (kKal/kg)}} \times 100$$

##### *Kinerja turbin gas*

- Efisiensi Turbin Gas Keseluruhan (%) (Turbin & Kompresor):

$$\frac{\text{Energi Keluar (kW)} \times 860}{\text{Bahanbakar Masuk untuk Turbin Gas (kg/ jam)} \times \text{GCV bahan bakar (kKal/kg)}} \times 100$$

##### *Kinerja generator steam pemanfaat kembali panas (hrsg)*

- Efisiensi Generator Steam Pemanfaat Kembali Panas (%):

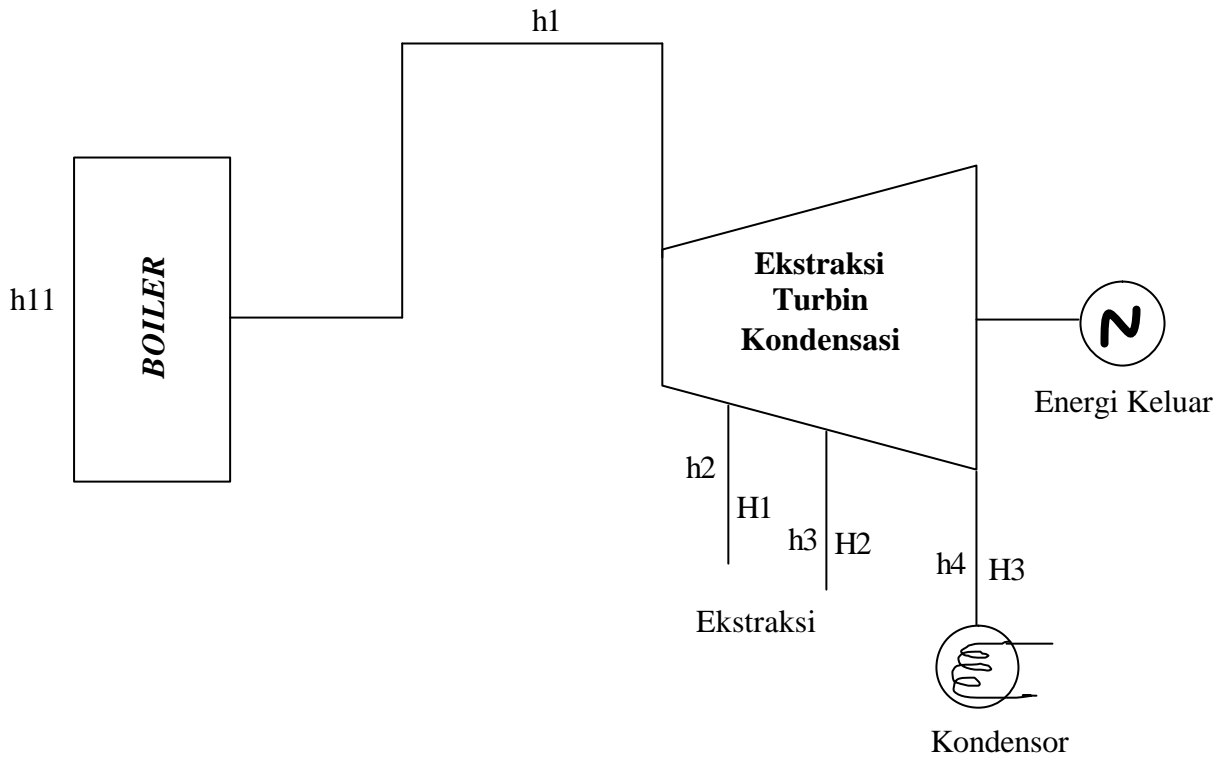
$$\frac{M_s \times (h_s - h_w)}{[M_f \times Cp (t_{masuk} - t_{keluar})] + [M_{aux} \times \text{GCV bahan bakar (kKal/kg)}]} \times 100$$

Dimana ,

- M<sub>s</sub> = Steam yang Dihasilkan (kg/jam)
- h<sub>s</sub> = Entalpi Steam (kKal/kg)
- h<sub>w</sub> = Entalpi Air Umpan (kKal/kg)
- M<sub>f</sub> = Aliran Massa Gas Buang (kg/jam)
- t<sub>in</sub> = Suhu Masuk Gas Buang (°C)
- t<sub>out</sub> = Suhu Keluar Gas Buang (°C)
- M<sub>aux</sub> = Pemakaian Bahan Bakar Tambahan (kg/jam)

### 3.2 Perhitungan untuk Sistem Kogenerasi Turbin Uap

Gambar dibawah memberikan gambaran mengenai empat langkah untuk menghitung kinerja sistem kogenerasi turbin uap, yang merupakan sistem kogenerasi paling umum di industri. *Catatan: sementara metodologi akan menerapkan ke seluruh sistem kogenerasi, rumus-rumus yang digunakan dibawah hanya diterapkan kepada sistem kogenerasi turbin uap.*



#### **Tahap 1: Perhitungan ekstraksi panas aktual dalam turbin pada setiap tahap**

Entalpi Steam pada saluran masuk Turbin	:	$h_1$ , kKal/kg
Entalpi Steam pada ekstraksi tahap 1	:	$h_2$ , kKal /kg
Entalpi Steam pada ekstraksi tahap 2	:	$h_3$ , kKal /kg
Entalpi Steam pada Kondensor	:	$h_4^*$ , kKal/kg

\* Karena steam yang basah dalam tahap kondensasi, entalpi steam tidak dapat dianggap sama dengan steam jenuh. Nilai kekeeringannya adalah 0,88 – 0,92. Nilai kekeeringan ini dapat digunakan sebagai perkiraan pertama untuk memperkirakan penurunan panas pada tahap terakhir. Walau begitu, disarankan untuk menghitung efisiensi tahap ahir dari efisiensi turbin keseluruhan dan efisiensi tahap lainnya.

Ekstraksi panas dari saluran masuk ke ekstraksi Tahap 1 ( $h_5$ ):

$$h_5 = (h_1 - h_2) \text{ kKal/kg}$$

Ekstraksi panas dari ekstraksi tahap 1 ke tahap 2 ( $h_6$ ):

$$h_6 = (h_2 - h_3) \text{ kKal/kg}$$

Ekstraksi panas dari ekstraksi tahap 2 ke kondensor (h7):

$$h7 = (h3 - h4) \text{ kKal/kg}$$

### Tahap 2: Memperkirakan ekstraksi panas teoritis

Dari diagram Mollier (Diagram H-f) perkirakan ekstraksi panas teoritis untuk kondisi dalam Tahap 1. Hal ini dilakukan dengan cara sebagai berikut:

- Plotkan titik kondisi saluran masuk turbin pada grafik Mollier – yang bersesuaian dengan suhu dan tekanan *steam*.
- Karena ekspansi pada turbin adalah proses adiabatik, entropinya konstan. Jadi gambarlah sebuah garis tegak lurus dari titik saluran masuk (sejajar dengan sumbu-y) hingga ke kondisi kondensasi.
- Bacalah entalpi pada titik dimana ekstraksi dan garis tekanan kondensasi bertemu garis tegak lurus yang digambar tadi.
- Hitung penurunan panas teoritis untuk tahapan ekspansi yang berbeda.

Entalpi Teoritis Setelah Ekstraksi Pertama	:	H1
Entalpi Teoritis Setelah Ekstraksi Kedua	:	H2
Entalpi Teoritis pada Kondisi Kondensor	:	H3

Ekstraksi Panas Teoritis dari Saluran Masuk ke Ekstraksi Tahap 1 (h8):  $h8 = h1 - H1$

Ekstraksi Panas Teoritis dari Tahap 1 ke Ekstraksi Tahap 2 (h9):  $h9 = H1 - H2$

Ekstraksi Panas Teoritis dari Kondensasi Ekstraksi Tahap 2 (h10):  $h10 = H2 - H3$

### Tahap 3: Menghitung efisiensi turbin

$$\text{Efisiensi Tahap 1} \left( \frac{h5}{h8} \right) = \left( \frac{\text{Ekstraksi Panas Aktual}}{\text{Ekstraksi Panas Teoritis}} \right) = \left( \frac{h1 - h2}{h1 - H1} \right)$$

$$\text{Efisiensi Tahap 2} \left( \frac{h6}{h9} \right) = \left( \frac{\text{Ekstraksi Panas Aktual}}{\text{Ekstraksi Panas Teoritis}} \right) = \left( \frac{h2 - h3}{H1 - H2} \right)$$

$$\text{Efisiensi Tahap Kondensasi} \left( \frac{h7}{h10} \right) = \left( \frac{\text{Ekstraksi Panas Aktual}}{\text{Ekstraksi Panas Teoritis}} \right) = \left( \frac{h3 - h4}{H2 - H3} \right)$$

### Langkah 4: Menghitung laju panas pabrik

$$\text{Laju panas (kKal/kWh)} = \frac{M \times (h1 - h11)}{P}$$

Dimana,

M = Laju alir massa steam (kg/jam)

h<sub>1</sub> = Entalpi steam masuk (kKal/kg)

h<sub>11</sub> = Entalpi air umpan (kKal/kg)

P = Energi rata-rata yang dibangkitkan (kW)

## 4. PELUANG EFISIENSI ENERGI

### 4.1 Peluang Efisiensi Energi pada Sistem Kogenerasi Turbin Uap

Peningkatan efisiensi energi yang berhubungan dengan kogenerasi dijelaskan dalam modul berikut:

1. **Boiler:** silahkan mengacu ke “Boiler dan Pemanas Fluida Termis”

2. **Turbin Uap:**

a. **Vakum kondensor:**

Vakum kondensor atau tekanan balik merupakan faktor yang sangat penting karena adanya perbedaan kecil dari nilai optimum dapat menghasilkan perubahan yang cukup berarti dalam efisiensi. Terdapat banyak alasan kenapa vakum kondensor dapat bervariasi dari nilai optimum seperti:

- Suhu masuk air pendingin berbeda dari nilai rancangan – hal ini merupakan alasan yang paling umum untuk variasi dalam vakum kondensor sebab suhu air pendingin secara signifikan dipengaruhi oleh kondisi cuaca seperti suhu dan kelembaban. Panas, cuaca lembab dapat mengakibatkan suhu air pendingin meningkat, menurunkan vakum kondensor dan mengurangi keluaran turbin (dengan penurunan efisiensi termis sebagai akibatnya). Dengan kata lain, kondisi cuaca kering dan dingin dapat memiliki pengaruh yang sebaliknya.
- Laju alir air pendingin bukan merupakan nilai yang benar.
- Pipa-pipa kondensor kotor atau beberapa diantaranya tersumbat
- Kebocoran udara yang menuju kondensor.

b. **Suhu dan tekanan steam:**

Jika kondisi suhu dan tekanan steam pada saluran masuk ke turbin uap bervariasi dari kondisi optimum perancangan, turbin mungkin tidak mampu beroperasi pada efisiensi maksimum.

Variasi kondisi steam dapat disebabkan berbagai kesalahan dalam perancangan pabrik (termasuk pengukuran), operasi pabrik yang tidak benar atau kotoran dalam boiler.

c. **Operasi beban sebagian dan mulai menyala & berhenti:**

Efisiensi unit pembangkit pada beban sebagian dapat dicapai mendekati nilai rancangan dengan memberikan perhatian terhadap seluruh item diatas. Walau demikian, keputusan pasar untuk mengoperasikan unit pembangkit pada beban tertentu akan memiliki pengaruh besar pada efisiensi termis rata-rata. Hal serupa, keputusan pasar pada kapan pabrik akan *on* atau *off-line* juga berakibat pada efisiensi termis rata-rata sebab ada kehilangan energi sewaktu sistem mulai menyala atau berhenti.

3. **Distribusi Steam dan Penggunaannya:** Silahkan mengacu pada Modul “Distribusi Steam dan Penggunaannya”

### 4.2 Peluang Efisiensi Energi pada Sistem Kogenerasi Turbin Gas

Peningkatan efisiensi energi dapat dilakukan pada Sistem Kogenerasi Turbin Steam sebagai berikut:

1. **Kompresor Udara:** Silahkan mengacu kepada Modul “Kompresor dan Sistem Udara Tekan”
2. **Turbin Gas:**
  - Suhu dan tekanan gas: Jika kondisi suhu dan tekanan gas pada saluran masuk ke turbin gas bervariasi dari kondisi optimum rancangannya, turbin mungkin tidak akan mampu beroperasi pada efisiensi maksimum. Variasi dalam kondisi gas dapat disebabkan oleh kesalahan-kesalahan perancangan pabrik (termasuk pengukuran) atau operasi pabrik yang tidak benar.
  - Operasi beban sebagian dan nyala & mati: Efisiensi unit pembangkit pada beban sebagian dapat dicapai mendekati nilai rancangan dengan memberikan perhatian terhadap seluruh item diatas. Walau demikian, keputusan pasar untuk mengoperasikan unit pembangkit pada beban tertentu akan memiliki pengaruh besar pada efisiensi termis rata-rata. Hal serupa, keputusan pasar pada kapan pabrik akan *on* atau *off-line* juga memiliki sikap pada efisiensi termis rata-rata sebab kehilangan energi sewaktu sistem menyala atau berhenti.
  - Suhu gas panas yang meninggalkan pembakar. Meningkatnya suhu biasanya mengakibatkan kenaikan output energi;
  - Suhu gas buang. Penurunan suhu biasanya mengakibatkan kenaikan keluaran energi;
  - Aliran massa melalui turbin gas. Umumnya, aliran massa yang lebih tinggi menghasilkan keluaran energi yang lebih tinggi pula;
  - Penurunan tekanan yang melintas *silencer* gas buang, saluran dan cerobong. Penurunan kehilangan tekanan meningkatkan keluaran energi;
  - Meningkatkan tekanan udara yang masuk atau meninggalkan kompresor. Peningkatan tekanan akan meningkatkan keluaran energi.
3. **Generator Steam Pemanfaat Kembali Panas:** Silahkan mengacu kepada Modul “Pemanfaatan Kembali Limbah Panas”

## 5. DAFTAR PERIKSA OPSI

Bagian ini memuat opsi-opsi efisiensi energi yang paling penting untuk kogenerasi

- Menggunakan gas buang untuk memanaskan udara dari kompresor (terutama digunakan dalam kondisi cuaca dingin);
- Membagi kompresor kedalam dua bagian dan mendinginkan udara diantara dua bagian;
- Membagi turbin kedalam dua bagian dan memanaskan ulang gas diantara dua bagian dengan melewati gas melalui *burner* dan *combustor* tambahan yang berlokasi diantara dua bagian;
- Pendinginan udara masuk. Hal ini terutama digunakan pada kondisi cuaca panas;
- Menurunkan kelembaban udara masuk;
- Meningkatkan tekanan udara pada pembuangan kompresor udara;
- Menginjeksikan *steam* atau air ke *combustors* atau turbin;
- Mencuci atau paling tidak membersihkan kotoran dari sudu-sudu kompresor udara dan turbin secara teratur dan
- Kombinasikan metode-metode diatas.

## 6. LEMBAR KERJA

Bagian ini meliputi lembar kerja sebagai berikut:

- Kinerja sistim kogenerasi turbin uap
- Kinerja sistim kogenerasi turbin gas

**Lembar Kerja 1: Kinerja sistim kogenerasi turbin uap**

No.	Parameter	Satuan	Nilai
1.	Pembangkitan Daya (P)	kW	
2.	Pembangkitan Steam (M)	TPJ	
3.	Tekanan Steam	kg/cm <sup>2</sup> (g)	
4.	Suhu Steam	<sup>0</sup> C	
5.	Entalpi Steam (hs)	kKal/kg	
6.	Suhu Air Umpan	<sup>0</sup> C	
7.	Entalpi Air Umpan (h4)	kKal/kg	
8.	Jumlah Ekstraksi	Jumlah	
9.	Kondisi Ekstraksi Pertama		
	Tekanan	kg/cm <sup>2</sup> (g)	
	Suhu	<sup>0</sup> C	
	Entalpi Aktual (h1)	kKal/kg	
	Entalpi Teoritis (H1)	kKal/kg	
10.	Kodisi Ekstraksi Kedua		
	Tekanan	kg/cm <sup>2</sup> (g)	
	Suhu	<sup>0</sup> C	
	Entalpi Aktual (h2)	kKal/kg	
	Entalpi Teoritis (H2)	kKal/kg	
11.	Kondisi Kondensasi		
	Tekanan	kg/cm <sup>2</sup> (g)	
	Suhu	<sup>0</sup> C	
	Entalpi Aktual (h3)	kKal/kg	
	Entalpi Teoritis (H3)	kKal/kg	
12.	Efisiensi Tahap Pertama $\{(h1 - h2) / (h1 - H1)\}$	%	
13.	Efisiensi Tahap Kedua $\{(h2 - h3) / (H1 - H2)\}$	%	
14.	Efisiensi Tahap Kondensasi $\{(h3 - h4) / (H2 - H3)\}$	%	
15.	Laju Panas <i>Plant</i> $[ M \times (hs - h4) ] / (P \times 1000)$	KKal/kWh	

**Lembar Kerja 2: Kinerja Kogenerasi Turbin Gas**

No.	Parameter	Satuan	Nilai
1.	Pembangkitan Energi (P)	kW	
2.	Masukan Bahan Bakar untuk Turbin Gas (F)	kg/jam	
3.	GCV Bahan Bakar	kKal/kg	
4.	HRSO (Generator Steam Pemanfaat Panas)		
	Steam yang Dihasilkan (Ms)	kg/jam	
	Entalpi Steam (hs)	kKal/kg	

	Entalpi Air Umpan (hw)	kKal/kg	
	Massa Gas Buang (Mf)	kg/jam	
	Suhu Masuk Gas Buang (tin)	<sup>0</sup> C	
	Suhu Keluar Gas Buang (tout)	<sup>0</sup> C	
	Pemakaian Bahan Bakar Tambahan (Maux)	kg/jam	
	GCV Bahan bakar	kKal/kg	
5.	<b>Efisiensi Turbin Gas</b> [P x 860 x 100] / [ F x GCV Bahan bakar]	%	
6.	<b>Efisiensi HRSG</b> [Ms x (hs – hw) x 100] / {[Mf x Cp x (tin – tout)] + [Maux x GCV Bahan bakar]}	%	

## 7. REFERENSI

Bureau of Energy Efficiency, Ministry of Power, India. *Energy Efficiency in Thermal Utilities*. 2004

California Energy Commission. *Kogenerasi Handbook*. 1982

Department of Energy, Queensland Government, Australia.

[www.energy.qld.gov.au/infosite/steam\\_turbines.html](http://www.energy.qld.gov.au/infosite/steam_turbines.html),  
[www.energy.qld.gov.au/infosite/condensers\\_cooling\\_sys.html](http://www.energy.qld.gov.au/infosite/condensers_cooling_sys.html) and  
[www.energy.qld.gov.au/infosite/facts\\_influence\\_thermal.html](http://www.energy.qld.gov.au/infosite/facts_influence_thermal.html)

National Productivity Council. *Assessing Kogenerasi potential in Indian Industries*. 2002

Polimeros, George. *Energy Kogenerasi Handbook*, Industrial Press Inc.

The European Association for the Promotion of Kogenerasi. [www.cogen.org/](http://www.cogen.org/)

United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (UNESCAP), Environment and Sustainable Development Division. Part 1: Overview of Kogenerasi and its Status in Asia. In: Guidebook on Kogenerasi as a Means of Pollution Control and Energy Efficiency in Asia. 2000. <http://www.unescap.org/esd/energy/publications/detail.asp?id=759>

### **Copyright:**

Copyright © United Nations Environment Programme (year 2006)

*This publication may be reproduced in whole or in part and in any form for educational or non-profit purposes without special permission from the copyright holder, provided acknowledgement of the source is made. UNEP would appreciate receiving a copy of any publication that uses this publication as a source. No use of this publication may be made for resale or any other commercial purpose whatsoever without prior permission from the United Nations Environment Programme.*

### **Hak Cipta:**

Hak cipta © United Nations Environment Programme (year 2006)

*Publikasi ini boleh digandakan secara keseluruhan atau sebagian dalam segala bentuk untuk pendidikan atau keperluan non-profit tanpa ijin khusus dari pemegang hak cipta, harus mencantumkan sumber yang membuat. UNEP akan menghargai pengiriman salinan dari setiap publikasi yang menggunakan publikasi ini sebagai sumber. Tidak diijinkan untuk menggunakan publikasi ini untuk dijual belikan atau untuk keperluan komersial lainnya tanpa ijin khusus dari United Nations Environment Programme.*

### **Disclaimer:**

*Modul peralatan energi ini dibuat sebagai bagian dari proyek “Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca dari Industri di Asia dan Pasifik/ Greenhouse Gas Emission Reduction from Industry in Asia and the Pacific” (GERIAP) oleh Badan Produktivitas Nasional, India. Sementara upaya-upaya masih dilakukan untuk menjamin bahwa isi dari publikasi ini didasarkan fakta-fakta yang benar, UNEP tidak bertanggung-jawab terhadap ketepatan atau kelengkapan dari materi, dan*

## *Peralatan Energi Termis: Kogenerasi*

*tidak dapat dikenakan sanksi terhadap setiap kehilangan atau kerusakan baik langsung maupun tidak langsung terhadap penggunaan atau kepercayaan pada isi publikasi ini*

### ***Disclaimer:***

*This energy equipment module was prepared as part of the project "Greenhouse Gas Emission Reduction from Industry in Asia and the Pacific" (GERIAP) by the National Productivity Council, India. While reasonable efforts have been made to ensure that the contents of this publication are factually correct and properly referenced, UNEP does not accept responsibility for the accuracy or completeness of the contents, and shall not be liable for any loss or damage that may be occasioned directly or indirectly through the use of, or reliance on, the contents of this publication, including its translation into other languages than English. This is the translated version from the chapter in English, and does not constitute an official United Nations publication.*