

## KAJI TERMOEKONOMI PEMANFAATAN PANAS PERCUMA DI PLTGU TAMBAK LOROK

Dwi Handoyo Saputro<sup>1</sup>, Nathanael P. Tandian<sup>2</sup>, Hendi Riyanto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Divisi Engineering dan Manajemen Aset PT. Indonesia Power UBP Semarang  
Jl. Ronggowarsito Semarang, Indonesia

Phone: +62-24-3518371, Fax: +62-24-3546835, E-mail: dwihandoyo@indonesiapower.co.id,  
dwihandoyo03@gmail.com

<sup>2</sup>Fakultas Teknik Mesin Institut Teknologi Bandung  
Jl. Ganesha 10 Bandung, Indonesia

Phone: +62-22-2504243, Fax: +62-22-2534099, E-mail: n4th4n.t4nd14n@gmail.com,  
hriyanto08@gmail.com

### ABSTRAK

Pada kondisi operasi saat ini, ketika turbin gas GE MS9001E PLTGU Tambak Lorok beroperasi timbul panas percuma (waste heat) sebesar 420,47 kW di ruang kopling (load compartment) yang terletak di antara turbin gas dan generator listrik karena letak ruang kopling tersebut berimpitan dengan saluran gas buang menuju HRSG. Panas percuma ini bisa dimanfaatkan lebih lanjut, salah satunya sebagai sumber panas generator sistem refrigerasi absorpsi. Pemanfaatan panas percuma di PLTGU Tambak Lorok akan dikaji kelayakannya secara termoekonomi. Kajian ini meliputi desain awal sistem refrigerasi absorpsi untuk 3 opsi pemanfaatan, yaitu (1) untuk meningkatkan daya luaran turbin gas melalui penurunan temperatur udara masuk ke kompresor, (2) sebagai substitusi sebagian atau seluruh beban sistem pengkondisian udara berbasis refrigerasi kompresi uap di gedung di area PLTGU Tambak Lorok dan (3) untuk mesin pembuat es dalam rangka melaksanakan program CSR bagi masyarakat nelayan di sekitar pembangkit. Hasil kajian menunjukkan bahwa Opsi I tidak bisa dilaksanakan karena memerlukan kapasitas pendinginan sebesar 1051,27 kW untuk menurunkan temperatur udara masuk kompresor turbin gas sebesar 2 K, yang lebih besar daripada kapasitas pendinginan yang mampu disediakan oleh sistem refrigerasi absorpsi panas percuma. Sedangkan Opsi II dan Opsi III dapat dipenuhi oleh sistem refrigerasi absorpsi yang memanfaatkan panas percuma. Di samping itu, Opsi II dan Opsi III masing-masing memberikan IRR sebesar 11,74% dan IRR 10,55%.

Kata kunci: panas percuma, termoekonomi, refrigerasi absorpsi, sistem pengkondisian udara, mesin es, IRR, CSR.

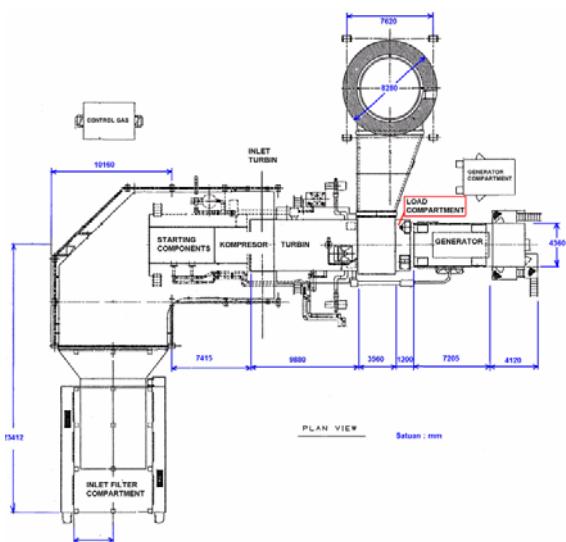
### 1. Pendahuluan

PLTGU Tambak Lorok tersusun dari 2 blok @480 MW. Setiap blok terdiri atas 3 turbin gas, 3 HRSG dan 1 turbin uap. Pada sistem PLTGU ini, energi termal gas produk pembakaran keluar dari turbin gas pada temperatur 560°C dimanfaatkan untuk membangkitkan uap di dalam HRSG. Kemudian, uap dari 3 HRSG digunakan untuk menggerakkan 1 turbin uap.

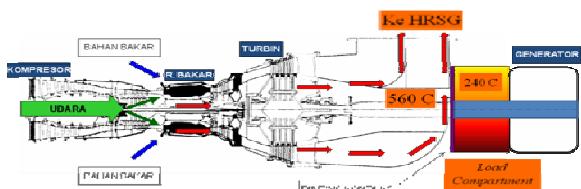
Dalam desainnya, Turbin gas GE MS9001E PLTGU Tambak Lorok memiliki ruang kopling (*load compartment*), yaitu ruangan yang berisi kopling penghubung antara poros turbin gas dan poros generator listrik (lihat Gambar 1). Dalam ruang kopling tersebut timbul panas percuma (*waste heat*) yang bersumber dari aliran gas buang turbin gas (lihat Gambar 2). Panas ini menyusup ke ruang kopling dengan cara:

- 1) Radiasi dan konveksi dari gas produk pembakaran ke dinding saluran HRSG dan ke dinding selubung poros.
- 2) Konduksi dari dinding saluran HRSG dan dinding selubung poros ke ruang kopling.
- 3) Konveksi dari dinding ruang kopling dan dinding selubung poros ke udara pendingin ruang kopling serta radiasi antara dinding-dinding ruang kopling.





Gambar 1. Posisi ruang kopling PLTGU Tambak Lorok.



Gambar 2. Turbin gas GE MS9001E PLTGU Tambak Lorok.

Pada saat pengujian pasca konstruksi (*commissioning*) tahun 1993, temperatur di ruang kopling mencapai 180°C. Hal ini menunjukkan bahwa perpindahan panas dari gas buang ke ruang kopling memang telah terjadi sejak awal tahun operasi. Panas yang berada di ruang kopling ini kemudian dibuang ke lingkungan dengan bantuan blower 88VG.

Pada kondisi operasi saat ini temperatur di ruang kopling mencapai 240°C. Hal ini terjadi akibat adanya gas panas yang menyusup masuk ke ruang kopling melalui retakan pada sambungan las di dinding antara saluran HRSG dan ruang kopling. Panas percuma di ruang kopling ini bisa dimanfaatkan lebih lanjut. Pemanfaatan panas pecuma yang akan dikaji di sini adalah untuk penerapan sistem refrigerasi absorpsi.

Kajian ini membahas tentang desain termal dan ekonomi (termoeconomis) dari 3 opsi aplikasi pemanfaatan panas percuma sebagai sumber panas generator sistem refrigerasi absorpsi, yaitu untuk:

- 1) Proses pendinginan udara masuk kompresor turbin gas.
- 2) Pengkondisian udara di dalam gedung atau sejumlah ruangan di sekitar pembangkit PLTGU Tambak Lorok.

- 3) Program *Corporate Social Responsibility* (CSR) berupa penyediaan ruang pendingin dan balok es bagi masyarakat nelayan di sekitar pesisir Tambak Lorok.

Apabila opsi-opsi tersebut secara termal layak diwujudkan, maka kajian akan dilanjutkan dengan melakukan analisa ekonominya.

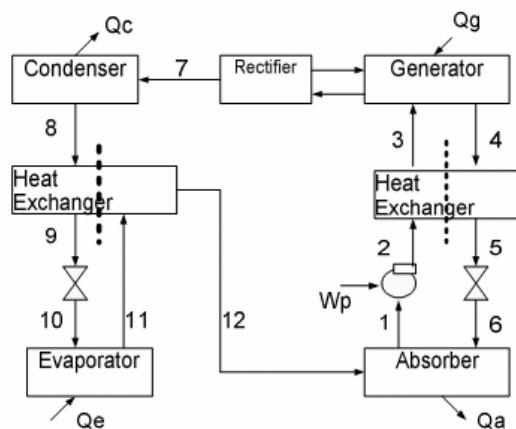
Analisa ekonomi yang digunakan adalah analisa *Internal Rate Of Return* (IRR) menggunakan konsep *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA). Analisa ekonomi yang digunakan mencakup hal-hal sebagai berikut:

- 1) Pemanfaatan panas percuma dikuantifikasi sebagai biaya yang harus dikeluarkan seandainya digunakan bahan bakar dengan energi yang setara dengan energi dari panas percuma.
- 2) *Life Cycle Cost* (LCC) merupakan biaya keseluruhan selama masa operasi peralatan selama 12 tahun termasuk biaya investasi, biaya operasi dan pemeliharaan (*O&M Cost*) serta biaya pembongkaran. LCCA lazim diterapkan untuk menganalisa keekonomian suatu peralatan.
- 3) IRR merupakan parameter keekonomian suatu kegiatan/proyek yang mencakup manfaat finansial yang dihasilkan, LCC dan pajak atas pendapatan yang dihasilkan. Secara umum IRR merupakan panduan dalam menentukan persetujuan suatu proyek. Nilai IRR minimal yang umumnya digunakan adalah di atas bunga kredit perbankan pada tahun berjalan. Perhitungan IRR untuk kasus ini merupakan selisih akhir dari kondisi awal saat panas percuma terbuang dengan kondisi akhir jika panas percuma dimanfaatkan melalui sistem refrigerasi absorpsi. Selain itu, IRR menggambarkan pula *cash flow* yang didapat dari pemanfaatan panas percuma selama masa keekonomian peralatan. *Cash flow* yang dimaksud adalah pengurangan nilai manfaat finansial dengan LCC dan investasi.

## 2. Potensi dan Pemanfaatan Panas Percuma

Berdasarkan perhitungan termal, potensi panas percuma yang terdapat di ruang kopling mencapai 420,47 kW. Panas ini dapat dimanfaatkan lebih lanjut untuk beberapa aplikasi yang menggunakan sistem refrigerasi absorpsi. Skema sistem refrigerasi absorpsi secara sederhana ditampilkan pada Gambar 3 berikut. Potensi penyerapan panas di evaporator sistem absorpsi bisa mencapai 210,23 kW, yaitu dengan mengasumsikan nilai COP yang lazim untuk sistem refrigerasi absorpsi sebesar 0,5.





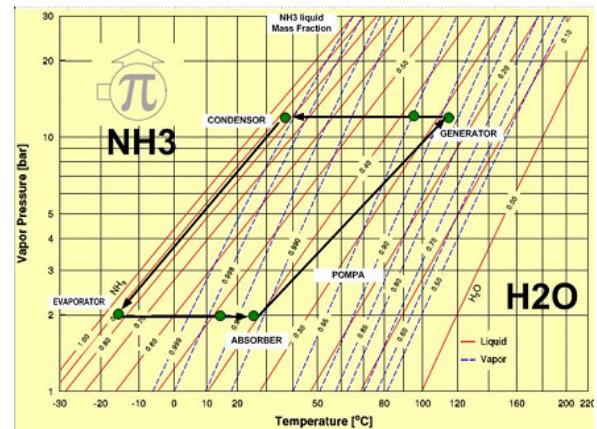
Gambar 3. Skema sistem refrigerasi absorpsi sederhana [1].

Parameter sistem refrigerasi absorpsi yang digunakan dalam rangka pemanfaatan panas percuma ini dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Fluida kerja yang diusulkan untuk digunakan pada sistem refrigerasi absorpsi panas percuma ini adalah  $\text{NH}_3$  sebagai refrigeran dan air sebagai absorber. Kedua fluida ini dipilih karena memiliki rentang pendinginan yang cukup besar dan mampu bertahan dalam kondisi temperatur di bawah  $0^\circ\text{C}$ . Berdasarkan parameter siklus di atas, Gambar 4 memperlihatkan diagram PTX [2] sistem refrigerasi absorpsi tersebut.

Tabel 1. Parameter Siklus Refrigerasi Absorpsi dalam Memanfaatkan Panas Percuma.

No	P (bar)	T ( $^\circ\text{C}$ )	Entalpi (kJ/kg)	m (kg/s)	Keterangan Alat
1	2,04	26,1	-58,2	2,58	Abs. Out
2	13,61	26,1	-56,8	2,58	Pump Out
3	13,61	93,3	253,6	2,58	Gen. In
4	13,61	115,6	369,9	2,3	
5	13,61	36,1	1,43	2,3	
6	2,04	36,1	1,43	2,3	
7	13,61	54,4	1512,1	0,28	Cond. In
8	13,61	36,1	344,3	0,28	Cond. Out
9	13,61	30	318,7	0,28	
10	2,04	-17,8	318,7	0,28	Eva In.
11	2,04	4,4	1442,3	0,28	Eva Out.
12	2,04	13,9	1467,9	0,28	Abs. In
Wpump =	3,61	kW			
Qeva =	314,61	kW			
Qgen =	563,52	kW			
COP =	0,55				



Gambar 4. Diagram PTX siklus refrigerasi absorpsi dalam pemanfaatan panas percuma.

### 3. Opsi I: Proses Pendinginan Udara Masuk Kompressor Turbin Gas.

Salah satu cara untuk meningkatkan kapasitas daya luaran turbin gas adalah melalui proses pendinginan udara masuk ke kompresor turbin gas. Tabel 2 berikut ini memperlihatkan panas total yang harus diserap refrigeran untuk menghasilkan penambahan kapasitas daya luaran turbin gas sesuai yang diinginkan.

Tabel 2 menunjukkan bahwa penurunan temperatur udara masuk kompresor (*inlet cooling*) terkecil, yaitu 2 Celsius, memerlukan penyerapan panas di evaporator sebesar 1051,27 kW. Panas ini tentunya, jauh lebih besar dibandingkan dengan potensi kapasitas pendinginan yang dapat disediakan oleh sistem refrigerasi absorpsi panas percuma yang hanya sebesar 210,23 kW. Kondisi ini menunjukkan bahwa Opsi I tidak layak secara termal sehingga analisa ekonomi tidak perlu dilakukan.

Tabel 2. Panas yang Harus Diserap Refrigeran guna Menurunkan Temperatur Udara Masuk Kompresor.

Inlet Cooling	T udara inlet awal	Entalpi (h)	T udara inlet akhir	Entalpi (h)	( $\Delta h$ )	m udara	Q Evaporator
$\Delta T$	$^\circ\text{C}$	kJ/kg	$^\circ\text{C}$	kJ/kg	kJ/kg	kg/s	kW
2	31	304,2	29	302,2	2,012	418	1051,270
4	31	304,2	27	300,2	4,024	418	2102,540
6	31	304,2	25	298,2	6,032	418	3151,720
8	31	304,2	23	296,2	8,040	418	4200,900
10	31	304,2	21	294,2	10,046	418	5249,035
12	31	304,2	19	292,2	12,050	418	6296,125



#### 4. Opsi II: Substitusi Evaporator Sistem Refrigerasi untuk Sistem Pengkondisian Udara di Bangunan di Sekitar Pembangkit PLTGU Tambak Lorok

Desain awal dari Opsi II mengikuti desain AC central existing yang digunakan di gedung-gedung PLTGU Tambak Lorok. Hal ini dimaksudkan untuk:

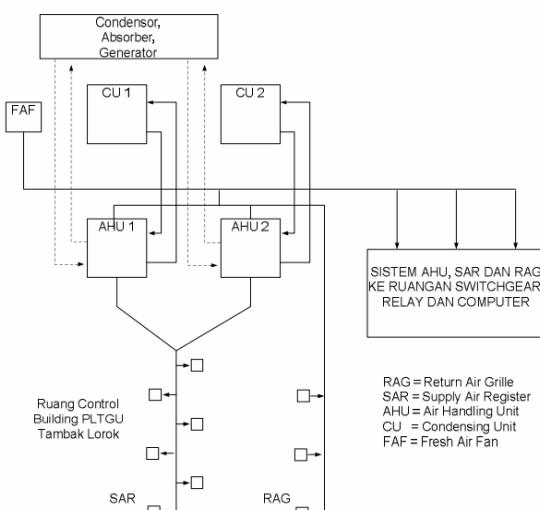
- 1) Mengurangi biaya investasi yang dibutuhkan.
- 2) Memperbaiki ketersediaan (availability) peralatan sistem refrigerasi yang terpasang sebelumnya (redundant evaporator).

AC central existing yang dipilih untuk penerapan Opsi II ini adalah AC central yang berada di ruangan dalam gedung kendali (control building) PLTGU Tambak Lorok. Dalam bangunan ini terdapat ruangan-ruangan yang beban pendinginannya sudah tertentu.

Pada ruang switchgear, ruang komputer dan ruang relay di control building diperlukan beban pendinginan sebesar 187,08 kW. Nilai ini lebih rendah dibandingkan dengan potensi kapasitas pendinginan evaporator sistem refrigerasi absorpsi panas percuma, yaitu 210,23 kW. Hal ini menunjukkan bahwa secara termal Opsi II layak dilakukan.

Gambar 5 berikut menunjukkan skema sistem pendingin udara di control building PLTGU existing yang telah dimodifikasi untuk penerapan Opsi II. Sedangkan desain awal termal dari Opsi II ini dijelaskan lebih lanjut melalui Tabel 3 berikut.

Karena Opsi II telah memenuhi kelayakan termal, maka selanjutnya dilakukan analisa ekonominya. Mengambil masa keekonomian peralatan selama 12 tahun, maka IRR Opsi II mencapai 11,74%. Angka ini cukup wajar dalam pertimbangan keputusan proyek, karena BI Rate yang dijadikan patokan bunga bank lebih kecil daripada IRR Opsi II tersebut.



Gambar 5. Skema Opsi II pemanfaatan panas percuma.

Tabel 3. Desain Awal Opsi II.

Sisi Evaporator				
Item	Capacity	Description		
<b>Room</b>		<b>Switch Gear</b>	<b>Control Building</b>	<b>Relay Computer Room</b>
AHU	cfm	8.000	7.964	8.750 2.800
	kW	55,78	54,08	56,28 20,94
<b>Fan</b>	cfm	8.000	7.964	8.750 2.800
	hp	3,38	4,25	3,8 1,17
<b>Motor</b>	rpm	950	1.003	988 840
	hp	4,5	5,50	5,5 1,3
<b>Dimensi</b>	(p x l x t) mm	845 x 2375 x 1915	845 x 2375 x 1915	845 x 2375 x 1915 715 x 1275 x 1625
<b>Refrigerant Conn.</b>				
<b>Suction</b>	in	1 3/8	1 1/8	1 1/8 1 3/8
<b>Liquid</b>	in	3/8	1/2	1/2 3/8
<b>Material fin</b>		Aluminium	Aluminium	Aluminium
<b>Material tube</b>		SS 304H	SS 304H	SS 304H
Sisi Generator				
Lokasi	Pipe Arrangement	Termodynamika		
<b>Load Compartment</b>	$S_T = S_L = 0,0508$ Jumlah pipa, $N_L = 24$ , $N_T = 16$ , $L = 1 \text{ m}$ Material : SS 304H	$h_g = 549,29 \text{ W/m}^2\text{K}$ $h_{NH_3} = 13,97 \text{ W/m}^2\text{K}$ $Q_{LC} = 397,03 \text{ kW}$		

#### 5. Opsi III : Program CSR Penyediaan Ruang Pendingin dan Balok Es Gratis bagi Nelayan di Sekitar Pesisir Tambak Lorok.

Area di sekitar PLTGU Tambak Lorok merupakan area pantai dan tambak. Mata pencarian sebagian besar masyarakat di sekitar Tambak Lorok adalah nelayan yang membutuhkan es dalam pekerjaannya sehari-hari. Kebutuhan balok es masyarakat nelayan tersebut sekitar 30 ton/hari [3].

Jumlah massa es yang dapat diproduksi melalui pemanfaatan panas percuma dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Q_{eva} = m_{air} (Cp_{air} \cdot \Delta T + h_{laten}) \quad (1)$$

dengan  $\Delta T = 30\text{K}$ ,  $Cp_{air} = 4,2 \text{ kJ/kg.K}$ ,  $h_{laten} = 2502 \text{ kJ/kg}$ . Sedangkan sumber air berasal dari air servis dengan temperatur  $30^\circ\text{C}$  di PLTGU Tambak lorok.

Berdasarkan perhitungan di atas, sistem refrigerasi absorpsi panas percuma dapat memproduksi es 7,37 ton/jam, yaitu 25,7% kebutuhan es masyarakat. Es yang diproduksi ini akan dibagikan secara gratis kepada masyarakat nelayan di sekitar pesisir Tambak Lorok.

Desain awal dari mesin pembuat balok es ini berbentuk layaknya refrigerator penghasil balok es dengan ukuran  $100 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$  ( $p \times l \times t$ ). Selanjutnya, Tabel 4 berikut ini memperlihatkan desain awal termodynamika Opsi III.



Tabel 4. Desain Awal Opsi III.

Komponen	Lokasi	Pipe arrangement	Termodinamika
Generator	Load	$S_T = S_L = 0,0508$	$h_g = 549,29 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Compartment	Jumlah pipa, $N_L = 24$ , $N_T = 16$ , $L = 1 \text{ m}$	$h_{NH_3} = 13,97 \text{ W/m}^2\text{K}$
		Material : SS 304H	$Q_{LC} = 397,03 \text{ kW}$
Evaporator	Mesin pembuat es (refrigeran NH <sub>3</sub> : -10 C)	$S_T = S_L = 0,0508$ Jumlah pipa: $N_L = 20$ , $N_T = 25$ , $D = 0,0254 \text{ m}$ , $V = 2 \text{ m/s}$ , $L = 3 \text{ m}$	$h_g = 11,951,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ $h_{NH_3} = 16,32 \text{ W/m}^2\text{K}$ $Q_{eva} = 236,42 \text{ kW}$

Kemudian, desain awal Opsi III tersebut disesuaikan dengan tipe mesin/pabrik pembuat es yang tersedia di pasaran. Tabel 5 berikut ini memperlihatkan pabrik es dengan kapasitas 8 ton/jam [4] beserta luas area yang dibutuhkannya. Luas area ini akan menjadi patokan dalam penentuan lokasi bagi Opsi III.

Tabel 5. Desain Awal Opsi III.

	Jenis	Ukuran	Ruangan tersedia	Lokasi
Bangunan Pembuat Es (8 ton/jam)	Ruang pembuatan es	3 m x 4 m	3 m x 4 m	Gudang mesin belakang
	Cold storage	9 m x 15 m	8 m x 15 m	Gudang mesin belakang
	Penampungan sementara	4 m x 15 m	4 m x 15 m	Gudang mesin belakang

Tabel 4 dan Tabel 5 di atas menunjukkan bahwa Opsi III layak secara termal, sehingga dapat dilanjutkan analisa ekonominya. Hasil analisa ekonomi menunjukkan bahwa nilai IRR Opsi III mencapai 10,55% untuk kurun perhitungan 12 tahun. Nilai ini menunjukkan bahwa Opsi III cukup layak secara ekonomi, karena berada di atas BI Rate.

## 6. Kesimpulan

Dari paparan di atas, dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan panas percuma di sistem PLTGU Tambak Lorok dengan menerapkan sistem refrigerasi absorpsi menunjukkan:

- 1) Secara termal panas percuma di ruang kopling dapat dimanfaatkan melalui salah satu dari dua opsi berikut, yaitu:
  - a) Opsi II: pemanfaatan panas percuma untuk pengkondisian udara gedung di sekitar pembangkit PLTGU Tambak Lorok.
  - b) Opsi III: pemanfaatan panas percuma untuk program CSR berupa penyediaan ruang pendingin dan balok es secara gratis bagi masyarakat nelayan di sekitar pesisir Tambak Lorok.
- 2) Secara ekonomi terlihat bahwa Opsi II maupun

Opsi III memiliki manfaat finansial.

- 3) Di samping itu, ke-dua opsi tersebut juga memberikan manfaat non-finansial bagi perusahaan. Opsi II dapat dilakukan untuk menaikkan keandalan peralatan kontrol instrumen di *control building* PLTGU Tambak Lorok karena ketersediaan sistem pengkondisian udara lebih tinggi jika evaporator sistem refrigerasi tekanan uap digunakan sebagai evaporator cadangan (*stand-by*). Khusus untuk Opsi III, manfaat non-finansialnya lebih berpengaruh pada sisi citra perusahaan dan hubungan sosial kemasyarakatan.

Usulan penempatan lokasi dari Opsi II dan III dapat dilihat pada Gambar 6 berikut.

## 7. Saran Pengembangan Lanjutan

Untuk pengembangan selanjutnya, perlu diperhatikan hal-hal berikut ini:

- 1) Perlu dilakukan optimalisasi konstruksi desain awal sistem refrigerasi absorpsi panas percuma, sehingga didapat biaya investasi yang lebih rendah. Hal ini akan meningkatkan IRR dari tiap opsi pemanfaatan panas percuma.
- 2) Hasil kajian yang dilakukan berlaku untuk 1 buah turbin gas. PLTGU Tambak Lorok memiliki 6 buah turbin gas, sehingga kombinasi dari ke-dua opsi dapat diterapkan. Rekomendasi: Turbin Gas 1.1 dapat menerapkan Opsi II dan Turbin Gas 2.3 dapat menerapkan Opsi III.
- 3) Opsi pemanfaatan panas percuma ini dapat digunakan sebagai model untuk PLTGU yang serupa, misalnya PLTGU Muara Karang (1 x 480 MW)



Gambar 6. Pandangan atas area PLTGU Tambak Lorok.

Keterangan :

A = Turbin Gas PLTGU Tambak Lorok (2 x 480 MW).



- B = Control Building PLTGU Tambak Lorok (Opsi II).  
C = Gudang mekanik PLTGU Tambak Lorok (perkiraan lokasi gedung mesin pembuat es (Opsi III).  
D = Perkiraan lokasi peralatan siklus absorpsi (Opsi II dan Opsi III).

### **Ucapan Terima Kasih**

Penulis mengucapkan terima kasih pada Penyelenggara program CEA (*Credit Earning Activity*) antara ITB dan PT. Indonesia Power, yang menjadi dasar pembuatan makalah ini.

### **Rujukan**

- [1] ASHRAE Handbook, 1997.
- [2] M. Conde Engineering, *Thermophysical Properties of NH<sub>3</sub> and H<sub>2</sub>O*, 2009.
- [3] Koran Suara Merdeka tanggal 02 Februari 2005.
- [4] [http://dkp.sumenep.go.id/?m=20&tampil=info\\_kec&kec=23](http://dkp.sumenep.go.id/?m=20&tampil=info_kec&kec=23).
- [5] GE Manual Book, *Operation Training*, MS9001E, General Electric.
- [6] Shapiro N. H., Moran M. J., *Fundamentals Of Engineering Thermodynamics*, 5<sup>th</sup> edition, John Wiley & Sons, USA, 2006.
- [7] Incropera, DeWitt, Bergman, Lavine, *Fundamentals Of Heat And Mass Transfer*, 6<sup>th</sup> edition, John Wiley & Sons, USA.
- [8] GER 3419A, *Turbin Gas Air Inlet Treatment*, GE, USA, 1991.
- [9] GER 3567H, *GE Turbin Gas Performance Characteristics*, USA, 2000.
- [10] Stoecker F.W., Jones J. W., *Refrigeration And Air Conditioning*, 2<sup>nd</sup> edition, McGraw-Hill Inc., 1985.

