

## Optimisasi Dimensi Kanal *Outfall* Air Pendingin PLTU Dengan Memperhatikan Dampak Lingkungan Pada Air Laut

Ghiffari Awliya Muhammad Ashfania<sup>1</sup>, Ismoyo Haryanto<sup>2</sup>,  
Haekal Awliya Muhammad Salman<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang.

<sup>2</sup>Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang.

<sup>3</sup>Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang.

### Abstract

*Most of the power generating machines such as PLTU are located near the coast, to make it easier to get condenser cooling water from seawater in large volumes. Current technology has made it possible to use seawater as a condenser cooling medium to save costs and use a limited amount of freshwater. In the condenser cooling process, the cooling water that comes out through the outfall canal has a significant temperature increase. On the other hand, this increase in seawater temperature can cause disturbance and damage to marine biota and the coastal environment. Therefore, it is required that the increase in seawater as cooling water for the PLTU must be within the limits of the seawater quality standards that have been set. Taking into account the environmental impact and technical requirements of the cooling capacity of the condenser, it is necessary to make an optimization method to achieve this goal. The optimization in this paper includes two interrelated issues, namely: First, the calculation of the heat transfer process from outfall seawater naturally to the surrounding air, with a maximum temperature delta limit between the temperature of seawater before entering the condenser (at seawater intake) and after exiting condenser (at the outfall). Second, optimizing the dimensions of the outfall canal so that the cost of making the outfall canal is optimal. From the results of the analysis, it is obtained that the optimization results successfully combine the technical requirements in the form of an optimal outfall canal dimension and the fulfillment of the requirements for the seawater environmental quality standard threshold.*

**Keywords:** *optimization, cooling water canal, sea water environmental*

### Abstrak

Sebagian besar mesin-mesin pembangkit tenaga listrik seperti PLTU berada di lokasi dekat pantai, untuk memudahkan mendapatkan air pendingin kondensor yang berasal dari air laut dalam volume yang besar. Teknologi saat ini sudah memungkinkan dipakainya air laut sebagai media pendingin kondensor untuk menghemat biaya dan pemakaian air tawar yang jumlahnya terbatas. Dalam proses pendinginan kondensor mengakibatkan air pendingin yang keluar melalui kanal outfall mengalami kenaikan temperatur yang cukup signifikan. Di sisi yang lain, kenaikan temperatur air laut ini dapat menimbulkan gangguan dan kerusakan pada biota-biota laut dan lingkungan pesisir. Oleh karena itu, disyaratkan bahwa kenaikan air laut sebagai air pendingin PLTU tersebut harus berada dalam batasan baku mutu air laut yang telah ditetapkan. Memperhatikan dampak lingkungan dan persyaratan teknis kapasitas pendinginan kondensor, perlu dibuat sebuah metoda optimisasi dalam rangka mencapai tujuan tersebut. Optimisasi dalam makalah ini meliputi dua persoalan yang saling terkait, yaitu: Pertama, perhitungan proses transfer kalor dari air laut outfall secara natural ke udara sekitar, dengan batasan delta temperatur maksimum antara temperatur air laut sebelum masuk kondensor (pada sea water intake) dengan setelah keluar kondensor (pada outfall). Kedua, optimisasi dimensi kanal outfall agar biaya pekerjaan pembuatan kanal outfall paling optimal. Dari hasil analisis diperoleh hasil optimisasi yang berhasil memadukan antara kebutuhan persyaratan teknik berupa dimensi kanal outfall yang optimal dan pemenuhan persyaratan ambang baku mutu lingkungan air laut.

**Kata kunci:** optimasi, saluran air pendingin, lingkungan air laut

### 1. Pendahuluan

Saat ini dunia memasuki era elektrifikasi, di mana semua kebutuhan energi dalam kehidupan manusia, baik dalam rumah tangga, bisnis dan industri menggunakan energi listrik sebagai energi utamanya. Energi listrik menjadi pilihan karena sangat fleksibel pemanfaatannya, termasuk untuk diubah menjadi bentuk energi yang lain (energi panas, cahaya, gerak, dan lain-lain). Akibat yang terjadi kemudian adalah bahwa jumlah mesin-mesin pembangkit tenaga listrik menjadi banyak dan kapasitasnya makin membesar per unitnya. Semakin besar kapasitasnya, maka akan semakin besar kebutuhan akan air pendingin kondensor. Air pendingin condenser diperlukan dalam rangka untuk menjaga siklus pembangkit dapat berjalan kontinyu dan efisien.

Karena kebutuhan volume air pendingin yang sangat besar, maka banyak mesin pembangkit dibangun di tepi pantai untuk mendapatkan air pendingin dari air laut yang tersedia melimpah. Penggunaan air laut menjadi pilihan, karena tidak perlu perlakuan khusus (*water treatment*) dan langsung bisa digunakan mengambil dari laut, kemudian dipompakan dengan menggunakan Cooling Water Pump (CWP) menuju kondensor untuk mendinginkan uap air keluar turbin menjadi condensate water sebelum dipanaskan dalam boiler lagi. Teknologi material terkini telah memungkinkan digunakannya air laut dalam jangka Panjang sebagai media pendingin kondensor tanpa mengubahnya terlebih dahulu menjadi air tawar. Dari sisi biaya produksi, maka penggunaan air laut sebagai media pendingin akan jauh lebih murah jika dibandingkan jika menggunakan air tawar hasil proses distilasi air laut.

### 1.1 Prinsip Kerja PLTU

Pada pembangkit listrik skala besar seperti Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU), digunakan fluida air sebagai media transfer kalor dari energi primer bahan bakar (batubara, minyak, gas, geothermal) yang kemudian dengan mengubah fasa air menjadi uap air dapat memutar turbin-generator untuk menghasilkan energi listrik dengan menggunakan prinsip Siklus Rankine. Siklus Rankine adalah model operasi mesin uap yang secara umum digunakan di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Sumber panas untuk siklus Rankine dapat berasal dari batubara, gas alam, minyak bumi, nuklir, biomasa dan panas matahari. Dalam siklus Rankine terdapat lima proses utama seperti yang divisualisasikan pada Gambar 1 dan 2, sebagai berikut [1]:

*Proses 1-2:* Fluida kerja (misalnya air) dipompa dengan *Boiler Feed Pump (BFP)* dari tekanan rendah menjadi tekanan tinggi. Pada tahap ini fluida kerja berfase cair sehingga hanya membutuhkan energi yang relatif kecil untuk proses pemompaan.

*Proses 2-3:* Air bertekanan tinggi memasuki *Boiler* untuk dipanaskan. Di sini air berubah fase menjadi uap jenuh. Proses ini berlangsung pada tekanan konstan (isobarik). Selanjutnya uap jenuh dipanaskan lagi dalam *superheater* menjadi uap superpanas.

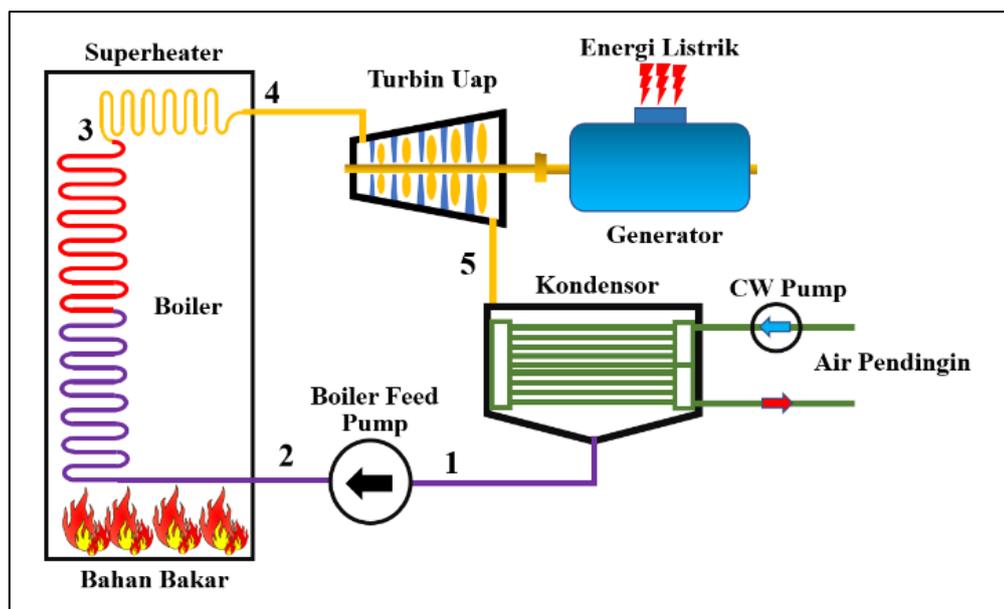
*Proses 3-4:* Uap jenuh selanjutnya dipanaskan lanjut dalam *Superheater* sehingga menjadi uap superpanas.

*Proses 4-5:* Uap superpanas berekspansi pada turbin sehingga menghasilkan kerja berupa putaran Turbin Uap. Proses ini menyebabkan penurunan temperatur dan tekanan uap, sehingga pada suhu turbin tingkat akhir kondensasi titik air mulai terjadi.

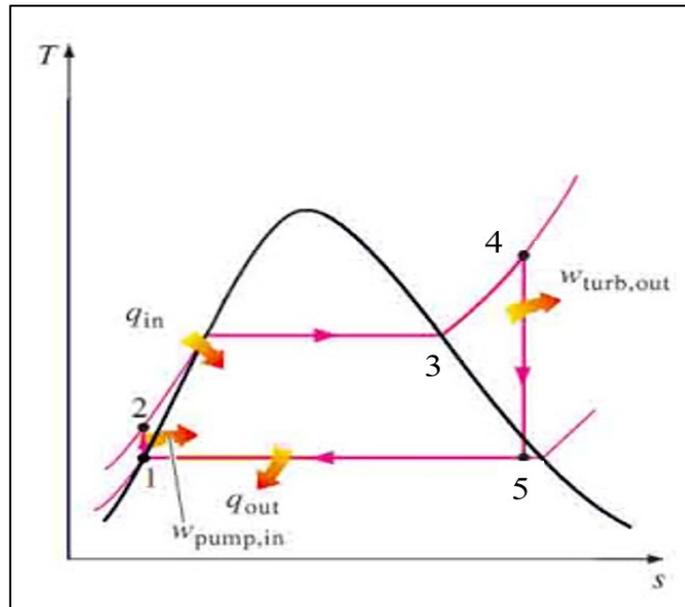
*Proses 4-5:* Uap basah memasuki kondensor dan didinginkan sehingga semua uap berubah menjadi fase cair. Air dipompakan kembali (*Proses 1-2*).

Dengan menggunakan media air pendingin dari air laut yang dipompakan dengan *Cooling Water Pump (CWP)* secara kontinu, uap ini menjadi air kondensat yang siap dipompakan kembali masuk ke *boiler*, sehingga membentuk siklus tertutup.

Besarnya kerja dibutuhkan pompa, panas yang diberikan boiler, kerja yang dihasilkan turbin dan panas yang dibuang pada kondensor dapat diperhitungkan dengan bantuan Tabel Enthalpy-Entropy Air-Uap air.



Gambar 1. Diagram alir proses operasi PLTU



Gambar 2. Diagram T-s siklus Rankine pada PLTU

### 1.2 Kebutuhan Air Pendingin Kondensor

Kondensor merupakan alat yang berfungsi untuk mengubah uap menjadi air. Prinsip kerja kondensor ialah proses perubahannya dilakukan dengan cara mengalirkan uap ke dalam suatu ruangan yang berisi pipa-pipa (*tubes*). Uap mengalir di luar pipa-pipa (*shell side*) sedangkan air sebagai pendingin mengalir di dalam pipa-pipa (*tube side*). Kondensor seperti ini disebut kondensor tipe surface (permukaan). Kebutuhan air untuk pendingin di kondensor sangat besar sehingga dalam perencanaan biasanya sudah diperhitungkan. Biasanya air pendingin diambil dari sumber yang cukup persediaannya, seperti laut, danau dan sungai. Posisi kondensor umumnya terletak di bawah turbin sehingga memudahkan aliran uap keluar turbin untuk masuk kondensor karena gravitasi.

Salah satu syarat agar operasi PLTU ini dapat berjalan secara efisien adalah kebutuhan akan air pendingin kondensor dalam jumlah yang besar. Fungsi utama dari sistem air pendingin adalah menyediakan dan memasok air pendingin yang diperlukan untuk mengkondensasikan uap bekas dan drain uap di dalam kondensor. Fungsi lainnya adalah memasok air untuk mendinginkan heat exchanger pada sistem air pendingin bantu (*auxiliary cooling water*) yang merupakan siklus pendingin tertutup.

Air pendingin utama merupakan media pendingin untuk menyerap panas laten uap bekas dari turbin yang mengalir ke dalam kondensor. Tanpa pasokan air pendingin turbin kondensasi tidak dapat dioperasikan. Sedangkan aliran air pendingin utama yang kurang dapat menyebabkan vakum kondensor menjadi rendah dan dapat mengakibatkan unit trip.

Sistem air pendingin harus dirancang mampu memenuhi kebutuhan operasi unit pembangkit secara kontinyu, ekonomis dan andal. Rancangan sistem air pendingin harus meliputi:

- Menjamin tersedianya air untuk keperluan operasi PLTU pada setiap waktu.
- Jumlah aliran airnya cukup untuk menghasilkan efisiensi PLTU yang optimal pada semua kondisi beban temperatur.
- Penyediaan air yang stabil pada semua kondisi tanpa perlu pengaturan
- Pemeliharaannya murah dan mudah dilakukan
- Biaya investasi dan operasinya rendah.

Jumlah dan temperatur air pendingin yang tersedia akan menentukan vakum kondensor maksimum yang dapat dicapai. Oleh karena itu banyak PLTU yang dibangun di tepi pantai (laut) berhubungan dengan tersedianya sumber air yang tak terbatas.

Aliran uap bekas (*exhaust steam*) turbin yang masuk kondensor harus terdistribusikan sedemikian rupa sehingga perpindahan panas laten uap ke air pendingin berlangsung dengan optimal. Fungsi utama kondensor hanya perlu untuk mengkondensasikan uap saja, pendinginan lebih lanjut justru akan merugikan.

Jumlah panas yang dibuang ke laut atau udara sangatlah besar, tetapi kerugian panas ini menjadi berkurang apabila kapasitas unitnya makin besar. Sebagai gambaran untuk mengkondensasikan 0,45 kg uap di kondensor diperlukan air pendingin sekitar 29 kg. PLTU kapasitas 300 MW atau lebih kecil memerlukan sekitar 0,22 m<sup>3</sup> air pendingin untuk setiap tenaga listrik yang dibangkitkan (0,22 m<sup>3</sup>/kWh). Sehingga air baku untuk PLTU Kapasitas 300 MW akan dipasok dari air laut dengan jumlah volume air laut sekitar 48.600 m<sup>3</sup>/jam (48,6 ton/jam) untuk sistem air pendingin (Adendum AMDAL, PLTU 4 Lontar, 2015).

## 2. Material dan Metode Penelitian

### 2.1 Komponen Biologi

Komponen biologi pada air laut di Kawasan Lontar terdiri dari: biota akuatik, seperti: plankton (pitoplankton dan zooplankton), benthos dan biota laut lainnya. Plankton merupakan organisme perairan yang mempunyai peran sangat besar terhadap kondisi suatu perairan. Peran tersebut tidak saja berkaitan dengan fungsinya sebagai strata atau tropik dasar dari jaring makanan di perairan, tetapi juga mempunyai peran terhadap perubahan lingkungan.

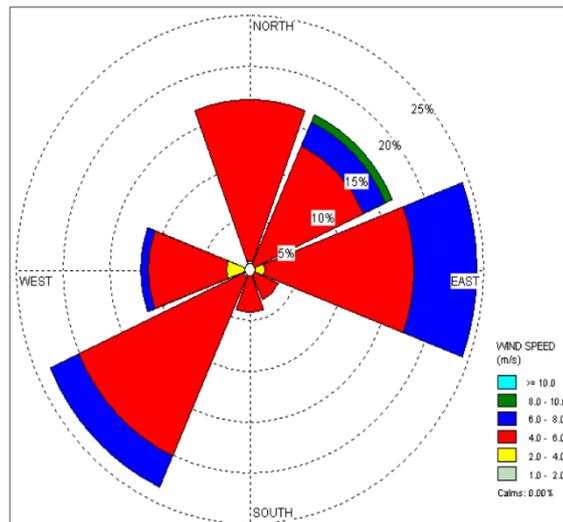
Jenis-jenis biota laut lain yang kerap dijumpai di perairan sekitar PLTU, antara lain: ubur-ubur (*Aurelia spp.*), jenis-jenis keping bakau dan ikan gelodok. Ikan gelodok dapat dijadikan sebagai indikator kualitatif terhadap kondisi pencemaran substrat berlumpur pada wilayah pasang surut. Jenis-jenis ikan yang kerap diperoleh para pemancing di sekitar jetty, antara lain ikan kakap putih, kerapu lumpur. Di bawah jetty kerap dijumpai jenis-jenis udang kecil, keping.

### 2.2 Suhu Udara

Berdasarkan data Badan Meteorologi Geofisika Klas I Tangerang temperatur udara di Kabupaten Tangerang tahun 2008–2010 berada pada suhu 25,90–28,50 °C, maksimum terjadi pada bulan September 2009 yaitu 28,50 °C dan suhu minimum pada bulan pebruari 2008 yaitu 25.90 °C. rata-rata suhu udara di Kabupaten Tangerang dalam kurun waktu tahun 2008–2010 yaitu 27,50 °C. Suhu rata-rata di Lontar sekitar 27 °C menghasilkan kondisi udara cenderung panas dengan kelembaban tinggi karena di samping laut.

### 2.3 Kondisi Angin

Angin dominan di wilayah PLTU Lontar bertiup dari barat daya dan timur laut dengan kecepatan mulai dari 7-11 knot, dengan gambaran arah angin (*wind rose*) disajikan pada Gambar 3 di bawah ini.



Gambar 3. Mawar Angin (*Wind rose*) di wilayah PLTU Lontar 2002-2012

### 2.4 Suhu Permukaan Air

Kondisi suhu permukaan air di lokasi rata-rata tahunan berada pada kisaran 28,1-30,5 °C dengan baku mutu berdasarkan PP No.81/2001 Kelas III suhu air permukaan = +/- 3°C suhu udara [2].

### 2.5 Baku Mutu Lingkungan Air Laut

Sebagai bagian dari ekosistem Bumi, laut mempunyai kehidupan tersendiri yang berbeda dengan lingkungan yang ada di darat. Di dalam air laut sekitar pantai banyak kehidupan berupa biota-biota laut maupun tumbuhan. Untuk dapat menjaga keberlangsungan kehidupan biota-biota laut tersebut, telah ditetapkan ambang baku mutu lingkungan air laut dengan batasan suhu permukaan: untuk kawasan yang ada *mangrove*: 28-32 °C, *coral*: 28-30 °C dan *lamun*: 20-30 °C [3].

### 2.6 Pencemar Air Limbah Panas

Pencemaran air laut dapat berupa air limbah panas (*thermal pollution*), yaitu masukan dalam jumlah besar air yang mengalami pemanasan dari satu atau sejumlah industri yang menggunakan sumber yang sama sehingga temperatur airnya melebihi kondisi normalnya serta dapat menyebabkan efek merugikan pada kehidupan perairan [4–11]. Industri air pendingin merupakan sumber awal panas di mana pembangkit tenaga listrik menggunakan 80% airnya untuk air pendingin [4,12]. Luas pengaruh limbah panas tergantung pada beberapa faktor yaitu volume air limbah, temperatur air limbah, temperatur air tempat pembuangan limbah, arus atau sirkulasi massa air tempat pembuangan limbah panas. Limbah panas menyebabkan pengaruh baik fisik, kimia maupun biologi. Secara fisik berpengaruh terhadap densitas, viskositas, tekanan uap, dan kelarutan. Pengaruh terhadap densitas dan viskositas berdasarkan hukum *Stokes* tentang pengendapan padatan dalam medium non-turbulen seperti dirumuskan sebagai berikut [4,13]:

$$V_t = \frac{D^2 g}{18\mu} (\rho_s - \rho_f) \quad (1)$$

dimana :

$V_t$	= kecepatan pengendapan (m/s)
$D$	= diameter partikel (m)
$g$	= kecepatan gravitasi ( $m/s^2$ )
$\mu$	= viskositas dinamik ( $N.s/m^2$ )
$\rho_s$	= densitas padatan ( $kg/m^3$ )
$\rho_f$	= densitas cairan ( $kg/m^3$ )

Berdasarkan persamaan tersebut dapat dilihat bahwa temperatur akan mengalami kenaikan dengan penurunan  $\rho_f$  dan  $\mu$ . Dan kemudian  $V_t$  naik, di mana kenaikan temperatur dipengaruhi oleh lokasi dan jumlah deposit sedimen. Densitas yang sedikit berbeda (0,001-0,002) dapat disebabkan oleh adanya stratifikasi, juga tergantung pada kedalaman dan pergerakan air yang menghambat pencampuran secara vertikal (*vertical mixing*) dan transfer oksigen. Pengaruh terhadap tekanan uap yang akan naik sejalan dengan kenaikan temperatur dan mempengaruhi laju evaporasi yang akan naik sejalan dengan kenaikan tekanan uap karena adanya perbedaan tekanan uap udara dan air serta aliran udara seperti persamaan sebagai berikut [4]:

$$F = \frac{CW}{L}(e_s - e_a) \quad (2)$$

dimana :

$F$	= flux evaporasi ( $kg/m^2s$ )
$L$	= panas laten ( $J/kg$ )
$C$	= koefisien empiris evaporasi
$W$	= kecepatan angin ( $m/s$ )
$e_s$	= tekanan uap dari udara jenuh pada temperatur di permukaan air (Pa)
$e_a$	= tekanan uap lapisan udara (Pa)

Kelarutan gas secara langsung sebanding dengan tekanan parsial yang dipengaruhi temperatur pada kondisi setimbang. Perubahan temperatur menyebabkan oleh perubahan keseimbangan dinamis oksigen dalam air yang kompleks yang berhubungan dengan reaerasi atmosfer, produksi fotosintesis, difusi, *mixing* dan sebagainya. Pengaruh secara kimia adalah terhadap kecepatan reaksi dimana reaksi pada kondisi yang setimbang akan berubah sejalan dengan perubahan temperatur. Kecepatan reaksi akan naik sekitar dua kalinya untuk setiap kenaikan temperatur  $100^\circ C$ . Banyak reaksi yang mempengaruhi kualitas air, yaitu reaksi biokimia dan sekitar pusat aktivitas mikroba. Rasa dan bau terjadi pada air yang hangat karena terjadinya penurunan kelarutan terutama gas  $H_2S$ ,  $SO_2$ ,  $CH_4$ ,  $SO_x$ . Efek temperatur mempunyai dampak spesifik sehingga perlu dipelajari efeknya terhadap spesies lokal yang penting. Tingkat oksigen dan salinitas turut mempengaruhi efek tersebut. Penurunan oksigen terlarut dan kenaikan laju metabolisme dapat berkombinasi yang membuat lingkungan kurang sesuai bagi kehidupan ikan. Temperatur air yang lebih hangat menyebabkan organisme perairan mengalami peningkatan laju respirasi dan peningkatan konsumsi oksigen serta lebih mudah terkena penyakit, parasit dan bahan kimia beracun. Sedangkan untuk meminimalisir efek panas yang berlebihan terhadap ekosistem perairan adalah dengan mengurangi penggunaan dan pembuangan listrik dan pembatasan jumlah buangan air panas ke dalam badan air yang sama, kontrol dengan dilusi, mentransfer panas dari air ke atmosfer dengan tower pendingin basah atau kering, pembuangan air panas ke dalam kolam yang dangkal atau kanal untuk pendinginan dan memanfaatkan kembali (*reuse*) sebagai air pendingin (*cooling water*).

Limbah air panas yang dibuang ke perairan dapat merubah kondisi perairan yang berakibat naiknya suhu lebih tinggi dari suhu ambien level-nya ( $30^\circ C$ ) dengan  $\Delta t$  sebesar  $7^\circ C$ . Naiknya suhu perairan berpengaruh terhadap kelarutan oksigen dalam air. Semakin tinggi suhu air, maka kelarutan oksigen makin rendah sehingga kandungan oksigen terlarut akan kecil. Dalam simulasi model dinamika sistem yang dihasilkan berdasarkan waktu, pada suhu di pelimbahan (*outlet*) sama dengan  $37^\circ C$  dan oksigen terlarut (DO) sama dengan  $7\text{ mg/l}$ , maka indeks keanekaragaman yang diperoleh dari simulasi sebesar 2,63. Hal ini menunjukkan kondisi perairan yang tercemar dengan tingkat pencemaran sedang. Kenaikan suhu di perairan menyebabkan oksigen terlarut menurun, kebutuhan oksigen biologi (BOD) meningkat dan kebutuhan oksigen kimia (COD) meningkat. Dalam simulasi model dinamika sistem terhadap waktu menunjukkan bahwa indeks keanekaragaman yang dipengaruhi oleh aliran informasi dari DO, BOD dan COD serta adanya proses pendinginan adalah sangat kecil, mendekati nilai 0 (nol). Hal ini menunjukkan bahwa biota air yang berada di pelimbahan (*outlet*) mati semua, walaupun pada waktu dilakukan sampling masih dapat tertangkap beberapa jenis plankton. Mengingat bahwa plankton bersi-fat melayang-layang, maka tertangkapnya jenis ini diduga karena mendapat limbah dari saluran pembuangan.

### 2.7 Perhitungan Luas Area Evaporasi Kanal

Proses perpindahan kalor dari air laut buangan outfall yang menyerap panas dari kondensor menggunakan proses konveksi alami antara permukaan air laut di kanal dengan udara di sekelilingnya.

Laju kalor yang keluar dari air laut dapat dirumuskan pada persamaan berikut ini:

$$\dot{Q} = (\dot{m})(c)(\Delta T_{sw}) = (\dot{m})(h_{in} - h_{out}) \quad (3)$$

dengan laju perpindahan kalor:

$$\dot{Q} = (h)(A)(LMTD) \quad (4)$$

atau dapat ditulis menjadi:

$$\dot{Q} = (h)(A)\left(\frac{(T_{1,sw}-T_{ca})-(T_{2,sw}-T_{ca})}{\ln\left(\frac{T_{1,sw}-T_{ca}}{T_{2,sw}-T_{ca}}\right)}\right) \quad (5)$$

Sehingga dapat dihitung luas area permukaan air laut di kanal, dengan persamaan:

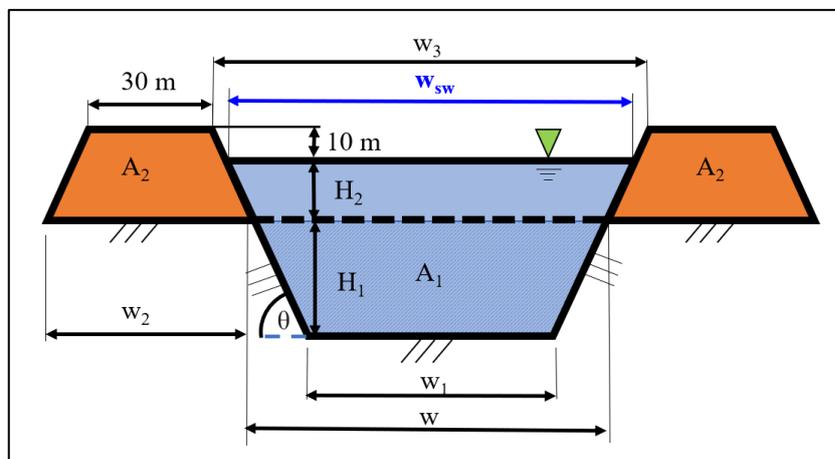
$$A = (\dot{Q})/(LMTD)(h) \quad (6)$$

Setelah  $A$  dapat dihitung dan panjang kanal ( $L_{SW}$ ) sudah ditetapkan berdasarkan kondisi lapangan, maka selanjutnya adalah tahapan penetapan lebar permukaan air di kanal, dengan persamaan:

$$w_{sw} = \frac{A}{L_{SW}} \quad (7)$$

### 2.8 Optimisasi Perhitungan Area Kanal

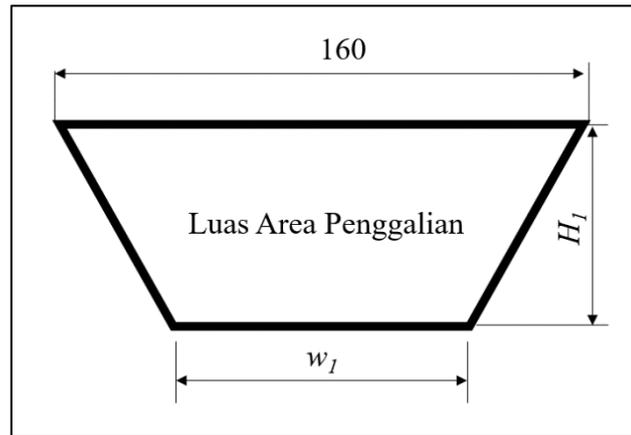
Hasil perhitungan lebar permukaan air laut pada kanal ( $w_{sw}$ ), menjadi konstanta utama dalam proses optimisasi penentuan dimensi area penampang kanal. Selain itu data parameter lainnya yang perlu ditetapkan sebelum proses optimisasi adalah: lebar kanal sejajar permukaan tanah ( $w$ ) dan tinggi permukaan air laut di kanal terhadap permukaan tanah ( $H_2$ ). Selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 4 di bawah ini.



Gambar 4. Bentuk penampang area kanal outfall air laut pendingin

Kriteria optimisasi adalah untuk mengurangi volume pengerukan kanal. Sistem biaya dibuat fungsi sebagai berikut:

$$f_2 = (w_1 + w)(H_1/2) \quad (8)$$



Gambar 5. Optimisasi luas area penggalian kanal

Dengan konstanta:  $w = 160$  m,  $w_2 = 70$  m,  $w_3 = 200$  m dan  $H_2 = 40$  m. Sehingga fungsi objektifnya diubah menjadi:

$$f_2 = (w_1 + 160)(H_1/2) \quad (9)$$

yang dapat dilihat pada Gambar 5 di atas.

Constraint luas area (bentuk trapezium), dengan ukuran maksimum 20.000 m<sup>2</sup>:

$$(w_1 + w_3)(H_1 + H_2 + 10)/2 \leq 20.000 \quad (10)$$

$$g_1 = (w_1 + w_3)(H_1 + H_2 + 10)/2 - 20.000 \leq 0 \quad (11)$$

$$g_1 = (w_1 + 200)(H_1 + 50)/2 - 20.000 \leq 0 \quad (12)$$

Constraint material penggalian kanal, luas penggalian kurang dari sama dengan 2 kali luas tanggul.

$$(2)(w_2 + 30)(H_2 + 10)/2 \leq (w_1 + w)(H_1/2) \quad (13)$$

$$g_4 = (2)(70 + 30)(H_2 + 10)/2 - (w_1 + 160)(H_1/2) \leq 0 \quad (14)$$

$$g_2 = 5000 - (w_1 + 160)(H_1/2) \leq 0 \quad (15)$$

Dari Gambar 3 dapat ditentukan persamaan:

$$\tan \theta = \frac{H_1}{w-w_1} = \frac{H_2+1}{w_2-3} = \frac{H_1+H_2+1}{w_3-w_1} \quad (16)$$

$$h_1 = \frac{H_1}{w-w_1} - \frac{H_2+10}{w_2-30} = 0 \quad (17)$$

$$h_1 = \frac{H_1}{160-w_1} - \frac{5}{4} = 0 \quad (18)$$

$$h_2 = \frac{H_1}{w-w_1} - \frac{H_1+H_2+10}{w_3-w_1} = 0 \quad (19)$$

$$h_2 = \frac{H_1}{160-w_1} - \frac{H_1+50}{200-w_1} = 0 \quad (20)$$

Semua variabel desain harus positif sehingga:

$$g_3 = -w_1 \leq 0 \quad (21)$$

$$g_4 = -H_1 \leq 0 \quad (22)$$

### 3. Rumusan Masalah

Dengan adanya penambahan pembangkit baru melalui Proyek PLTU #4 Lontar Extension, maka kapasitas terpasang total seluruh pembangkit yang ada di Lontar adalah 4 X 315 MW atau 1.260 MW. Terkait dengan penambahan kapasitas maka kebutuhan volume air pendingin maksimum juga makin besar menjadi 4 X 48.6 ton/jam = 194.4 ton/jam. Hal ini harus diikuti dengan penambahan dimensi *cooling water outfall canal*, dalam rangka agar proses pelepasan panas dari air pendingin ke udara secara natural dapat berlangsung dengan baik. Dan akhirnya selisih temperatur air laut di ujung *outfall* maksimal 2 °C di banding air laut yang masuk ke *water intake*.

Dalam perancangan *CW outfall canal* ini, perlu dilakukan optimisasi dengan dua tujuan:

- Berapa dimensi lebar kanal *outfall* agar kapasitas panas air laut buangan *outfall* dapat diserap maksimal ke udara ketika air buangan sampai di ujung kanal.
- Proses optimisasi untuk penentuan dimensi penampang area dari *outfall canal*, sehingga diperoleh nilai optimal volume pengerukan kanal dalam rangka menghemat biaya pelaksanaan

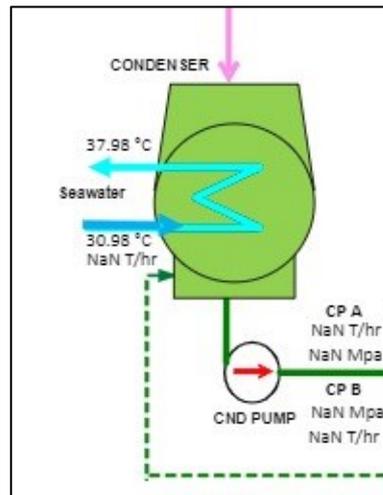
#### 4. Hasil dan Pembahasan

Sebelum memulai proses perhitungan, ditetapkan beberapa asumsi pada proses perhitungan luas area permukaan air laut di kanal, sebagai berikut:

- Distribusi temperatur pada aliran air laut dianggap konstan, sehingga temperatur dasar aliran sama dengan temperatur permukaan aliran air laut.
- Angka konstanta pengganti diasumsikan berdasarkan data dari *journal paper*.
- Transfer kalor yang terjadi diasumsikan dengan temperatur udara selalu konstan

#### 4.1 Data-data Parameter Operasi

Parameter operasi yang berkaitan dengan perancangan dimensi kanal outfall air laut dapat dilihat pada Gambar 6 dan Tabel 1 di bawah ini.

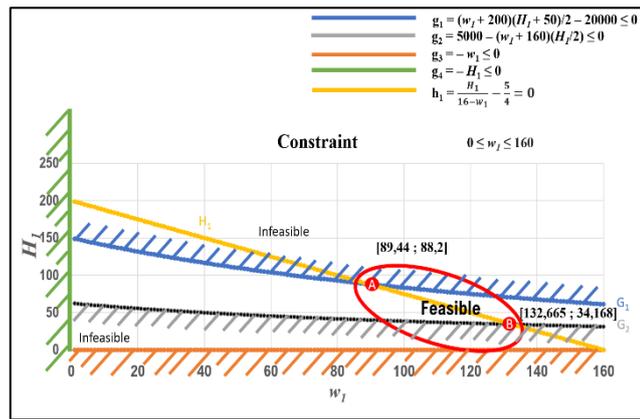


**Gambar 6.** Diagram parameter operasi kondensator pada salah satu PLTU Lontar

**Tabel 1.** Data parameter operasi kondensator

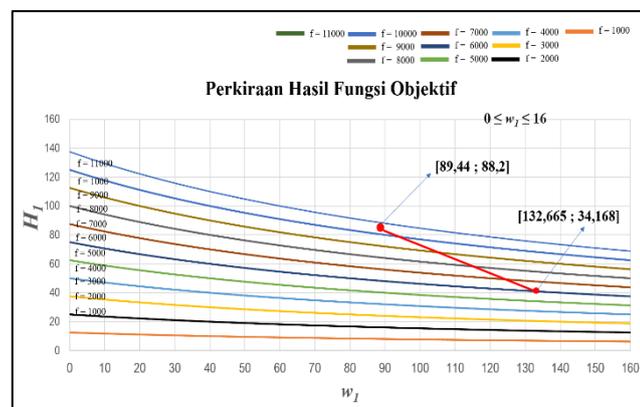
Laju massa air laut keluar <i>Condenser</i> #1	15.128 kg/s
Suhu air laut keluar <i>Condenser</i> #1	36,37 °C
Laju massa air laut keluar <i>Condenser</i> #2	12.625 kg/s
Suhu air laut keluar <i>Condenser</i> #2	36,37 °C
Laju massa air laut keluar <i>Condenser</i> #3	13.394 kg/s
Suhu air laut keluar <i>Condenser</i> #3	36,37 °C
Suhu air laut total	34,28 °C
Suhu air laut pendingin sampai laut	$28,68^{\circ}\text{C} \leq T_{2,sw} \leq 30,68^{\circ}\text{C}$
Laju Massa Air Laut, Total	41.147 kg/s
Salinitas ( $\approx 20\%$ )	19-21%
Densitas	1.020 kg/m <sup>3</sup>
Kapasitas kalor	4,010 kJ/kg.K
Suhu udara pendingin masuk	$T_{1,ca} = 28^{\circ}\text{C}$
Laju kalor dengan <b>Konveksi Bebas</b> , Koefisien laju kalor	750 W/(m <sup>2</sup> K)

Jika diselesaikan dengan menggunakan metode grafis, maka hasilnya dapat dilihat pada Gambar 7 di bawah ini.



Gambar 7. Solusi optimisasi dengan metode grafis

Prakiraan hasil fungsi objektif dapat dilihat pada Gambar 8 di bawah ini.



Gambar 8. Prakiraan hasil fungsi objektif

Masukkan 2 Titik ke Dalam Fungsi Objektif:

$$f_2 = (w_1 + 160)(H_1/2) \tag{9}$$

Dengan  $w_1 = 8,944$  dan  $H_1 = 8,82$ , maka setelah dimasukkan ke dalam persamaan fungsi objektif hasilnya menjadi:

$$f_2 = (89,44 + 160)(88,2/2) = 11.000,304 \approx 11.000 \text{ m}^2$$

Dengan  $w_1 = 132,665$  dan  $H_1 = 34,168$ , maka setelah dimasukkan ke dalam persamaan fungsi objektif, diperoleh hasil sebagai berikut:

$$f_2 = (132,665 + 160)(34,168/2) = 4.999,89 \approx 5000 \text{ m}^2$$

Dari kedua hasil perhitungan di atas, maka untuk meminimalisasi volume tanah yang digali, didapatkan dengan ukuran minimum trapezium penggalian sebesar  $5.000 \text{ m}^2$ .

## 5. Kesimpulan

### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil perhitungan perpindahan kalor air laut buangan *outfall* ke udara diperoleh luas area permukaan air laut di kanal sebesar:  $\text{m}^2$ , dengan Panjang m dan lebar m. Kemudian dari hasil proses optimisasi perancangan dimensi luas are penampang kanal, diperoleh hasil perhitungan luas area sebesar  $\text{m}^2$ , dengan total volume pengerukan tanah paling optimum sebesar  $\text{m}^3$ .

### 5.2 Saran

Hasil perhitungan dengan metode optimisasi ini dapat diaplikasikan untuk memeriksa ulang dimensi penampang kanal *outfall* pada PLTU-PLTU lainnya terkait dengan perubahan kondisi lingkungan sekitarnya. Tujuannya adalah agar kondisi temperatur air laut di ujung kanal memenuhi baku mutu lingkungan air laut, yang pada akhirnya dapat menjaga keberlangsungan lingkungan hidup di laut sekitar PLTU.

### Daftar Pustaka

- [1] Reynolds, William C., and Perkins, Henry Crawford, 1977, Engineering Thermodynamics, McGraw-Hill.
- [2] Uni Lab Perdana, 2014, Hasil Analisis Suhu Permukaan Air di Perairan Lontar, Kabupaten Tangerang.
- [3] KMNLH, Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No.51 Tahun 2004 tentang Baku Mutu Air Laut, 2004.
- [4] Neves, R. dan Lourenco, S., 1996, Thermal Pollution. <http://www.Cape.canterbury.ac.Nz/archive/THERMAL/tte1.htm>
- [5] Anonimous, 2000, General Environmental Multi-lingual Thesaurus (GEMET), <http://www.gemet.com>
- [6] \_\_\_\_\_, 2001, Explosive Dictionary (Definitions of Technical Terms),
- [7] Ratterman, Gretchen, 2003, The Thermal Pollution of Water. <http://outreach.ecology.uga.edu/watershed/thermal/htm>.
- [8] <http://www.willamette.edu/~ecaruso/thermal.htm>
- [9] <http://projects.ghostwhell.com/dictionary>
- [10] <http://MathInScience.info>
- [11] \_\_\_\_\_, 2004, Thermal Pollution,
- [12] Kristanto, Philip, 2002, Ekologi Industri, LPPM Univ. Kristen Petra Surabaya & Andi Yogyakarta.
- [13] Tchobanoglous, G dan Burton, F.L., 1991. Waste-Water Engineering: Treatment, Disposal and Reuse. McGraw-Hill. New York. USA.
- [14] \_\_\_\_\_, 1996, Model Pencemaran Limbah Air Panas Pembangkit Listrik Tenaga Uap Tambak Lorok di Kolam Pelabuhan Tanjung Emas Semarang, Tesis-Universitas Indonesia.
- [15] Huboyo, H.S., Zaman, B., Analisis Sebaran Temperatur dan Salinitas Air Limbah PLTU-PLTGU Berdasarkan Sistem Pemetaan Spasial (Studi Kasus: PLTU-PLTGU Tambaklorok Semarang), Jurnal Persipitasi Volume 3 No.2, 2007.
- [16] PT PLN (Persero), Adendum Analisa Dampak Lingkungan Hidup - Rencana Pengembangan Unit 4 (300-400MW) PLTU 3 Banten di Kabupaten Tangerang Provinsi Banten, 2015.