

ANALISIS PROSES DESALINASI PADA
SISTEM SINGLE EFFECT EVAPORATION (SEE)

Nurlaila *)

Abstrak

ANALISIS PROSES DESALINASI PADA SISTEM SINGLE EFFECT EVAPORATION (SEE). *Single Effect Evaporation (SEE)* adalah desain sederhana dari *Multi Effect Desalination (MED)* yang mempunyai fungsi dan komponen yang sama. Perbedaannya terletak pada temperatur dan tekanan serta jumlah efeknya. Pada makalah ini hanya dibahas mengenai unjuk kerja dari sistem SEE tanpa kombinasi dengan sistem pompa panas, dengan menampilkan hasil hitungan mengenai Perbandingan Unjuk Kerja (*Performance Ratio, PR*), Luasan Transfer Panas Spesifik (*Specific Heat Transfer Area, sA*), Laju Alir Pendingin Air Laut Spesifik (*Specific Cooling Seawater Flow Rate, sM_{cw}*) dan Perbandingan Konversi (*Conversion Ratio, CR*). Perbandingan Unjuk Kerja serta perbandingan jumlah air laut dan jumlah air yang dihasilkan dari SEE (*sM_{cw}*) ini selanjutnya dapat digunakan sebagai parameter untuk menentukan layak atau tidaknya SEE untuk skala industri. Perhitungan yang dipakai menggunakan komputasi dengan model matematika yang dikembangkan oleh El-Desouky dan Ettouney (1999). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa PR lebih kecil dari 1 dan membutuhkan air laut dalam jumlah yang jauh lebih besar. Disimpulkan bahwa SEE kurang layak untuk skala industri.

Abstract

DESALINATION PROCESS ANALYSIS ON SINGLE EFFECT EVAPORATION (SEE) SYSTEM. *Single Effect Evaporation (SEE)* is the simple design of *Multi Effect Desalination (MED)*, with the same functions and components. The differences are on their temperature, pressure and the number of effects. This paper discusses the performance of SEE system without heat pump system combination. This paper describes calculation results on *Performance Ratio (PR)* comparison, *Specific Heat Transfer Area (sA)*, *Specific Cooling Seawater Flow Rate (sM_{cw})* and *Conversion Ratio (CR)*. The calculation results can be used as the parameter to determine whether SEE is feasible or not to industrial scale. The calculation for this paper uses mathematic model which is developed by El-Desouky and Ettouney (1999). The result shows that PR is lower than 1 and the system needs substantial amount of seawater. Based on the calculation results, SEE is not feasible to industrial scale.

*) *Bidang Partisipasi Industri Nasional P2EN - BATAN*

I. PENDAHULUAN

Instalasi desalinasi merupakan industri yang menghasilkan air bersih, telah beroperasi di beberapa negara di belahan dunia, khususnya di negara-negara Teluk, California Selatan dan Kepulauan Karibia. Industri desalinasi ini telah dikembangkan sejak permulaan tahun 50-an.

Tipe desalinasi yang telah dikembangkan di dunia adalah tipe desalinasi termal dan membran. Saat ini lebih dari 12.506 unit desalinasi ditemukan di lebih dari 100 negara di dunia dengan total kapasitas produksi $22,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{hari}$, El-Desouky et. al. (1999). Kapasitas produksi dari industri desalinasi dipenuhi oleh lebih dari 65% proses desalinasi termal. Peluang pasar (*market share*) didominasi oleh tipe MSF (*Multi Stage Flash*) yaitu sekitar 90%, sedang sisanya 10% diisi oleh tipe SEE (*Single Effect Evaporation*) dan MEE (*Multiple Effect Evaporation*). Diyakini oleh para penulis bahwa dalam waktu dekat dua tipe terakhir ini akan mendominasi pasar. Untuk memenuhi hal tersebut unit desalinasi SEE harus mempunyai jumlah produksi yang cukup, persyaratan kapital yang rendah, harga operasi yang rendah, dan prosedur operasi dan pemeliharaan yang sederhana. Karena itu sistem SEE dikonstruksi dengan ciri-ciri: kompak, bahan kimia untuk *treatment* sederhana, efisiensi termal tinggi, energi pompa rendah, dan mempunyai fleksibilitas operasi yang tinggi.^[2]

Untuk memperbaiki unjuk kerja (*performance*) dari sistem SEE ini, dibuat model desain SEE yang dikombinasikan dengan variasi penambahan pompa panas (*heat pump*), salah satunya adalah sistem SEE yang dikombinasikan dengan *Thermal Vapor Compression* (SEE-TVC). El-Desouky telah membuktikan bahwa operasi sistem TVC ini pada temperatur uap (*steam*) yang lebih tinggi, akan menurunkan luasan transfer panas spesifik (*the specific heat transfer area*) dan dimana harga kapital sistem lebih rendah. Disamping itu operasi pada temperatur uap yang tinggi akan memperbaiki unjuk kerja, dimana ada penurunan konsumsi energi (*energy consumption*) dari sistem.^[2]

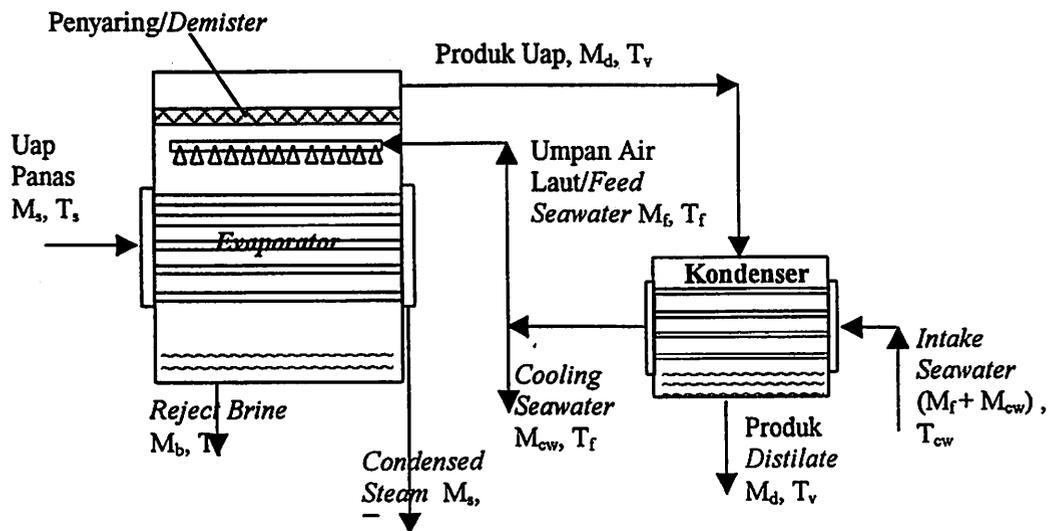
Pada makalah ini hanya akan dibahas mengenai unjuk kerja dari sistem SEE tanpa kombinasi dengan sistem pompa panas, dengan menampilkan hasil hitungan mengenai Perbandingan Unjuk Kerja (*Performance Ratio, PR*), Luasan Transfer Panas Spesifik (*Specific Heat Transfer Area, sA*), Laju Alir Pendingin Air Laut Spesifik (*Specific Cooling Seawater Flow Rate, sM_{cw}*) dan Perbandingan Konversi (*Conversion Ratio, CR*).

II. DASAR TEORI

II.1. Deskripsi Teknis *Single Effect Evaporation* (SEE)

SEE merupakan desain sederhana dari MED. Kalau pada MED terdapat beberapa efek dengan perbedaan temperatur dan tekanan pada setiap efeknya, sementara pada SEE hanya mempunyai satu efek saja.

Seperti pada MED, dalam proses ini air laut dialirkan atau disemprotkan (seperti *shower*) mengenai pipa berisi uap panas (*heating steam*) yang berasal dari *boiler* atau pembangkit. Semprotan air laut yang mengenai pipa panas menyebabkan air laut tersebut terpisah menjadi dua bagian yaitu titik-titik air dan uap. Pada proses ini terjadi perpindahan panas yang diasumsikan sebagai perpindahan panas konveksi. Asumsi ini berdasarkan bahwa pada kenyataannya memang terdapat aliran perpindahan panas yang berasal dari uap panas pada pipa yang ditangkap oleh titik air yang berasal dari semprotan air laut. Karena tidak ada paksaan pada proses ini maka proses ini disebut juga konveksi bebas (*natural*). Bedanya pada SEE titik-titik air tersebut jatuh menjadi *brine*, yang selanjutnya dipompakan ke laut. Sedangkan yang berupa uap, akan langsung dialirkan pada suatu pipa menuju bagian kondenser. Skema diagram SEE ini dapat dilihat pada Gambar 1 berikut.^[2]



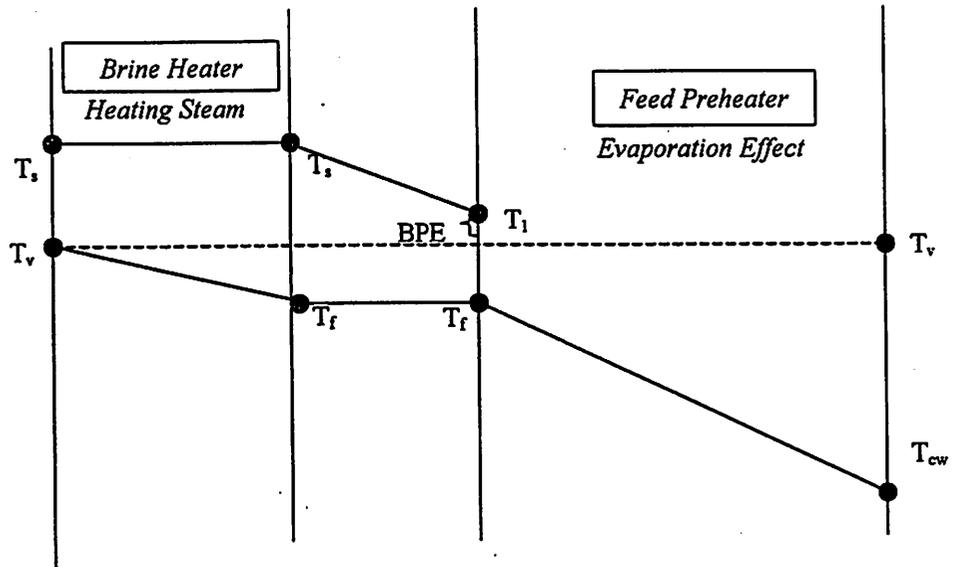
Gambar 1. Skema Diagram *Single Effect Evaporation* ^[2]

Seperti terlihat pada diagram di atas, SEE terdiri dari dua bagian, yaitu bagian evaporator dan kondenser. Bagian evaporator ini digerakkan oleh Uap Panas Jenuh (*Saturated Heating Steam*) yang berasal dari pembangkit. Air laut (*Intake Seawater*) masuk ke dalam kondenser, dimana temperaturnya dinaikkan oleh penyerapan panas

laten (*latent heat*) dalam bentuk uap *distilate*. Proses ini diperlukan untuk memperbaiki efisiensi dan untuk memindahkan panas yang ditambahkan ke sistem oleh uap panas. Selanjutnya untuk menghasilkan umpan air laut yang sesuai dengan kebutuhan (d disesuaikan dengan karakteristik alat), diperlukan *intake seawater* yang lebih banyak. Untuk itu ada sebagian air laut yang dikembalikan ke laut yang disebut *Cooling Seawater*.

Bagian air laut (*Feed Seawater*) yang keluar dari kondenser membentuk aliran umpan (*feed*) ke *evaporator*, yang kemudian disemprotkan di atas tabung (*tube*) horizontal dalam *evaporator*. Air laut ini dipanaskan terlebih dulu dalam kondenser untuk meningkatkan unjuk kerja termal dari proses. Disamping itu juga diberikan perlakuan kimiawi (*chemical treatment*) untuk mencegah busa dan kecenderungan formasi skala dalam *evaporator*, selanjutnya air laut ini dipompakan ke *evaporator*. Semprotan air laut ini membentuk *falling film* menutup tabung *evaporator* dan menyerap panas laten dari uap panas. Panas ini meningkatkan temperatur semprotan air laut sampai jenuh, dimana mulai terjadi penguapan. Temperatur dari uap ini lebih kecil dari temperatur didihnya dengan elevasi titik didih (*Boiling Point Elevation, BPE*) sebesar 1,99. Bentuk uap akan dilewatkan ke penyaring (*Demister*) agar terpisah dengan *brinenya* untuk mencegah kontaminasi dari air produk dan kerusakan pada tabung kondenser yang disebabkan oleh korosi permukaan dan reduksi transfer panas. Kemudian produk uap dikondensasi di kondenser menjadi produk *distilate*. Selanjutnya sisa uap panas terkondensasi menjadi air (*Condensed Steam*) dan dikembalikan ke pembangkit.

Profil temperatur pada SEE ini dapat dilihat pada diagram di bawah ini.



Gambar 2. Profil Temperatur SEE

II.2. Model Matematika SEE

Hasil yang ditampilkan pada bagian ini adalah Perbandingan Unjuk Kerja (PR) Termal, Luasan Transfer Panas Spesifik (sA), Laju Alir Pendingin Air Laut Spesifik (sM_{cw}) dan Perbandingan Konversi (CR). Data lain yang dibutuhkan adalah Temperatur (T), Laju Alir (M) dan Salinitas (X). Pada SEE ini laju alir (*flow rate*) dari air laut yang masuk dinyatakan dengan M_f yang perlu ditambahkan lagi dengan *Cooling Seawater* yang dinyatakan dengan M_{cw}, untuk meningkatkan efisiensi, dengan temperatur air laut (*feed water temperature, T_f*). Aliran uap panas yang berasal dari pembangkit dinyatakan dengan M_s dengan temperatur T_s. Produk uap dan *distilate* dinyatakan dengan M_d dengan temperatur T_v. Sementara massa *brine* yang dibuang (*reject brine*) dinyatakan dengan M_b dan temperatur didih (*boiling temperatur, T₁*).^{2,3)}

Model matematika dari sistem SEE merupakan persamaan bahan dasar dan keseimbangan energi serta hubungannya dengan perkiraan koefisien transfer panas/*heat transfer* (λ). Berdasarkan variabel-variabel yang terdapat pada SEE di atas, maka model matematika dari sistem SEE ini adalah sebagai berikut:

1. Keseimbangan Material

o Keseimbangan Massa Total : $M_f = M_d + M_b$ (1)

o Keseimbangan Konsentrasi Garam Total : $M_f X_f = M_b X_b$ (2)

Berdasarkan model (1) dan (2) ini maka dihasilkan persamaan untuk mengetahui massa *brine*, yaitu $M_b = M_d (X_b / (X_b - X_f))$ (3)

dan persamaan massa *steam* : $M_s = M_d (X_b / (X_b - X_f))$ (4)

2. Keseimbangan Energi Evaporator dan Kondenser

o Daya Termal Evaporator : $Q_e = M_f C_p (T_1 - T_f) + M_d \lambda_v = M_s \lambda_s$ (5)

o Daya Termal Kondenser : $Q_c = (M_f + M_{cw}) C_p (T_f - T_{cw}) = M_d \lambda_v$ (6)

Sementara itu besarnya M_f diketahui dari persamaan (1), sehingga persamaan (5) menjadi :

$$M_s \lambda_s = M_b C_p (T_v - T_f) + M_b C_p (T_1 - T_f) + M_d \lambda_v \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$T_1 = T_v + BPE \quad \dots\dots\dots (8)$$

sehingga

$$M_s \lambda_s = M_d \left((1 + X_f / (X_b - X_f)) C_p (T_v - T_f) + (X_f / (X_b - X_f)) C_p BPE + \lambda_v \right) \dots\dots\dots (9)$$

$$PR = \frac{M_d}{M_s} = \frac{\lambda}{\lambda_s + C_p(T_v - T_f) \frac{X_b}{X_b - X_f} + \frac{X_f}{X_b - X_f} C_p BPE} \dots\dots\dots (10)$$

$$sM_{cw} = \frac{M_{cw}}{M_d} = \frac{\lambda_v - (X_b/(X_b - X_f))C_p(T_f - T_{cw})}{C_p(T_f - T_{cw})} \dots\dots\dots (11)$$

3. Luasan Transfer Panas untuk *Evaporator* dan *Kondenser*

a. Luasan Transfer Panas *Evaporator* : A_e

Tergantung pada perbedaan jumlah energi panas yang dipindahkan (Q_e) terhadap keseluruhan Koefisien Transfer Panas (U_e) dan perbedaan temperatur uap panas (T_s) serta temperatur air laut (T_1).

$$A_e = \frac{Q_e}{U_e(T_s - T_1)} = \frac{M_f C_p(T_1 - T_f) + M_d \lambda_v}{U_e(T_s - T_1)} \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{A_e}{M_d} = \frac{(X_b/X_b - X_f)C_p(T_1 - T_f) + \lambda_v}{U_e(T_s - T_1)} \dots\dots\dots (13)$$

b. Luasan Transfer Panas *Kondenser* : A_c

$$A_c = \frac{Q_c}{U_c(LMTD)_c} = \frac{M_d \lambda_v}{U_c(LMTD)_c} \dots\dots\dots (14)$$

$$(LMTD)_c = T_v - ((T_{cw} + T_f)/2) \dots\dots\dots (15)$$

Berdasarkan persamaan (15), maka Luasan Transfer Panas *Kondenser* adalah :

$$A_c = \frac{M_d \lambda_v}{U_c(T_v - ((T_{cw} + T_f)/2))} \dots\dots\dots (16)$$

$$\frac{A_c}{MM_d} = \frac{\lambda_v}{U_c(T_v - ((T_{cw} + T_f)/2))} \dots\dots\dots (17)$$

III. METODOLOGI

Metode yang dipakai dalam makalah ini adalah komputasi dengan model matematika yang dikembangkan oleh El-Desouky dan Ettouney (1999). Data yang digunakan untuk perhitungan diambil dari berbagai literatur terbitan luar negeri, situs yang tersedia di internet dan hasil diskusi anggota tim studi desalinasi.

IV. ANALISIS HASIL PERHITUNGAN

Perhitungan untuk sistem SEE ini dengan menggunakan kondisi air laut di Laut Tengah. Hasil perhitungan diperoleh dengan menggunakan persamaan-persamaan di atas. Untuk memudahkan perhitungan pada sistem SEE ini diasumsikan massa aliran produk *distilate* M_d sebesar 1 kg/m^3 .

Data lain yang diperlukan untuk perhitungan ini adalah sebagai berikut : Temperatur air lautnya (T_{cw}) sebesar 25°C dengan salinitas air laut (X_l) sebesar 42.000 ppm dan salinitas *brine* maksimum (X_b) yang dibuang ke laut adalah 70.000 ppm. Pada hitungan ini yang digunakan adalah salinitas *brine* maksimum, sedangkan salinitas dari produk *distilate* diabaikan (dianggap nol) karena terlalu kecil jika dibandingkan dengan salinitas *brinenya*, yaitu sekitar 25 ppm. Range temperatur didihnya adalah : $55^\circ\text{C} \geq T_1 \geq 100^\circ\text{C}$. Konstanta panas spesifik (*constant specific heat*, C_p) adalah : $4,2 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$.

Selanjutnya hasil perhitungan seluruhnya dapat dilihat pada *spread sheet* terlampir. Berdasarkan perhitungan tersebut diperoleh hasil sebagai berikut:

Performance Ratio (PR) SEE = 0,97, ini menunjukkan bahwa dengan satu kg uap panas (*steam*) dihasilkan 0,97 kg *distilate*, jadi untuk mencapai satu kg *distilate* diperlukan massa *steam* yang lebih dari 1 kg. Luasan Transfer Panas Spesifik (sA) adalah $182,5 \text{ m}^2/\text{kg/s}$. Selanjutnya adalah Laju Alir Pendingin Air Laut Spesifik (sM_{cw}) yaitu perbandingan antara massa *cooling seawater* (M_{cw}) dengan massa *distilate* (M_d), yaitu sebesar 17,09 artinya untuk menghasilkan 1 kg *distilate* diperlukan 17,09 kg *cooling seawater*. Perbandingan Konversi (CR) yang merupakan perbandingan dari massa umpan air laut (M_l) dengan massa *distilate* (M_d), yaitu sebesar 2,5. Hal ini menunjukkan bahwa untuk menghasilkan 1 kg *distilate* diperlukan 2,5 kg umpan air laut.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dari *Single Effect Evaporation* dapat disimpulkan sebagai berikut :

- Perbandingan unjuk kerja (*Performance Ratio*, PR) dari *Single Effect Evaporation* ini kurang dari 1, yaitu sebesar 0,97. Hal ini menunjukkan bahwa massa air produk (*distilate*) akan selalu lebih rendah dibandingkan dengan massa *steam*, yang berarti *Single Effect Evaporation* ini kurang cocok jika digunakan untuk skala industri. Nilai PR kurang dari 1 sebagai akibat pembuangan sejumlah besar energi *brine* dan aliran *cooling seawater*.
- Massa aliran air laut yang masuk (M_{cw}) lebih besar dari massa air produk, dengan perbandingan mencapai 17,09 atau sekitar 1700 %. Hal ini berarti akan diperlukan energi yang cukup besar untuk memompa air laut, pipa-pipa dengan diameter yang

besar untuk mengalirkan air laut yang masuk, dan juga bahan kimia untuk *treatment* dan menghilangkan bakteri-bakteri lebih besar lagi, kesemuanya ini akan memerlukan biaya yang tidak sedikit.

- Luasan transfer panas spesifik dan Laju Alir Pendingin Air Laut Spesifik sensitif terhadap variasi temperatur didih dan temperatur air laut yang masuk, yaitu akan berkurang dengan penambahan temperatur didih dan pengurangan temperatur air laut yang masuk. Hal ini karena penambahan ada koefisien transfer panas pada *evaporator* dan kondenser, yang menyebabkan peningkatan nilai transfer panas.

DAFTAR PUSTAKA

1. El-Dessouky, Hisham T., et al, "Performance of Parallel Feed Multiple Effect Evaporation System for Seawater Desalination", Department of Chemical Engineering College of Engineering and Petroleum, Kuwait 1999.
2. M. Ettouney, Hisham, et al, "Computer Package for Design/Rating Thermal Desalination Processes", Department of Chemical Engineering College of Engineering and Petroleum, Kuwait 1999.
3. Al-Juwayhel, Faisal, et al, " Analysis of Single Effect Evaporator Desalination Systems Combined with Vapor Compression Heat Pumps", Chemical Engineering Department, Kuwait University, Kuwait 1997.

Lampiran

SPREAD SHEET HASIL PERHITUNGAN DARI SINGLE EFFECT EVAPORATION (SSE)

PROBLEM SPECIFICATION			
The feed seawater flow rate	M_f	kg/s	2,50
The feed water temperature	T_f	°C	70,00
The cooling seawater flow rate	M_{cw}	kg/s	17,09
The seawater temperature	T_{cw}	°C	25,00
The seawater temperature	M_b	kg °C/s	1,50
The seawater temperature	T_1	°C	75,00
The seawater temperature	M_d	kg/s	1,00
The seawater temperature	X_f	ppm	42000,00
The seawater temperature	X_b	ppm	70000,00
The seawater temperature	M_s	kg/s	1,03
The seawater temperature	T_s	°C	82,00
The seawater temperature	C_p	kJ/kg °C	4,20
The seawater temperature	BPE	°C	1,99
The seawater temperature	l_v	kJ/kg	2326,30
The seawater temperature	l_s	kJ/kg	2303,28
CASE STUDY			
The vapor temperature	T_v	°C	73,01
The specific heat transfer area	sA	m ² /kg/s	-43108149,24
The specific cooling water flow rate	sM _{cw}	m ² /kg/s	0,93
The Performance Ratio	PR	kg distillate/kg steam	-11,46
The overall heat transfer coefficient for the evaporator	U_o	kJ/sm ² °K	-107770374,04
The overall heat transfer coefficient for the condenser	U_c	kJ/sm ² °K	1,69
The evaporator thermal load	Q_o	kW	2370,31
The condenser thermal load	Q_c	kW	0,00
Logarithmic Mean Temperature Difference	(LMTD) _c	°C	-9,79
Evaporator heat transfer area	A_o	m	0,00
Conversion Ratio	CR	kg feed seawater/kg distillate	0,00
Condenser heat transfer area	A_c	m	0,20
	A_v/M_d	m ² /kg/s	-9,79
	A_c/M_d	m ² /kg/s	0,00