

## PERKIRAAN BIAYA MODAL SPESIFIK ATAS PABRIK MULTI EFEK DISTILASI

Lisna Krisan Wibowo<sup>1</sup>, Raka Dimas Saputra<sup>1</sup>, Suci Dhiya Mayra Suherman<sup>1</sup>, Ainiyyah Fatin<sup>1</sup>, Kristin Valentina Sinabutar<sup>1</sup>, Mohammad Djaeni<sup>2</sup>, Dessy Agustina Sari<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang  
Jalan HS Ronggowaluyo Telukjambe Timur, Karawang, Jawa Barat 41361.

<sup>2</sup> Departemen Teknik Kimia, Fakultas Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro  
Jalan Prof. Soedarto, SH, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah.

\*Email: dessy.agustina8@staff.unsika.ac.id

**Abstrak**

Desalinasi telah banyak diaplikasikan ke penanganan krisis air bersih di sejumlah negara. Salah satu macam teknologi desalinasi yang umum digunakan adalah Multi Efek Distilasi (MED). Pilihan ini merupakan tipe yang tepat untuk mengubah air laut menjadi air konsumsi. Biaya produksi air dan membutuhkan suhu yang rendah mampu memberikan peluang bagi penggunaan energi terbarukan sebagai sumber panasnya. Namun, di masa lalu MED mengalami kegagalan persaingan dengan MSF – Multi Efek Flash. Kelemahannya berada di biaya modal (CapEx – Capital Expenditure). Hal ini menjadikan peluang adanya kebutuhan peninjauan ulang atas kekurangan tersebut. Korelasi antara biaya modal dan kapasitas pabrik menjadi salah satu metode umum mengkalkulasi biaya modal pabrik MED. Hasilnya untuk kapasitas pembangkit 10.000 - 16.000 m<sup>3</sup>/hari didapatkan biaya spesifik yang tidak pernah mencapai di bawah \$2400 per m<sup>3</sup>/hari. Selain itu, biaya modal pabrik MED meningkat seiring bertambahnya jumlah efek pada luas permukaan perpindahan panas. Kemudian, usia kelangsungan pabrik, tingkat salinitas air umpan, dan lokasi pendirian pabrik juga dapat dimanfaatkan sebagai korelasi lainnya dalam memperkirakan biaya modal pabrik MED.

**Kata kunci:** air laut, desalinasi, multi efek distilasi, multi efek flash, pabrik distilasi.

**Abstract**

Several countries have applied desalination technology to deal with the clean water crisis. One type of desalination technology that is commonly used is Multi-Effect Distillation (MED). This option is the right type to convert seawater into drinking water. The cost of producing water and the need for low temperatures are factors that can provide opportunities for the use of renewable energy as a source of heat. However, in the past, MED has failed to compete with MSF - Multi Effect Flash. The downside is the cost of capital (CapEx - Capital Expenditure). This price creates an opportunity for a review of these deficiencies. The correlation between capital costs and plant capacity is one of the common methods for calculating MED plant capital costs. As a result, for a generating capacity of 10,000 - 16,000 m<sup>3</sup>/day, the specific charge is never below \$2400 per m<sup>3</sup>/day. In addition, the capital cost of the MED plant increases as the number of effects on the surface area of heat transfer increases. Then, the longevity of the mill, the level of salinity of the feed water, and the location of the factory establishment can also be used as other correlations in estimating the capital cost of the MED plant.

**Keywords:** desalination, distillation plant, multi effect flash, multi effect distillation, seawater.

**1. PENDAHULUAN**

Sejak tahun 1928, desalinasi menjadi salah satu strategi yang diadopsi untuk menangani masalah kelangkaan air bersih pada beberapa wilayah di dunia. Sejumlah besar fasilitas desalinasi berlokasi di Amerika Serikat, China dan Australia serta di seluruh wilayah Eropa, Afrika Utara dan Timur Tengah) (Eke *et al.*, 2020), (Jones *et al.*, 2019), (Chen *et al.*, 2016). Desalinasi merupakan proses penghilangan garam dari air laut untuk menghasilkan air bersih yang memenuhi persyaratan kualitas

(salinitas) dengan tujuan kebutuhan berbeda-beda (Jones *et al.*, 2019).

Pabrik desalinasi komersial menggunakan dua kategori teknologi yaitu desalinasi membran - MD (contohnya reverse osmosis - RO) (Wenten and Khoiruddin, 2016), (Al-Obaidi *et al.*, 2018), serta desalinasi termal (seperti: multi-stage flash – MSF dan multi-efek distilasi - MED) (Rahimi *et al.*, 2015). Kategori pertama ini dianggap sebagai teknologi yang paling cepat berkembang dan luas penggunaannya bagi desalinasi air

(Abdelshafy, Hassan and Jurasz, 2018). Hal ini disebabkan oleh prosesnya yang lebih matang, dapat diandalkan, dan berefisiensi energi yang lebih baik (Lin and Elimelech, 2015). Dari segi penerapan bila dibandingkan desalinasi membran dan desalinasi termal (terutama MED), RO memiliki konsumsi energi listrik yang lebih rendah (R Semiat, 2008) dengan kisaran suhu operasi 50-70°C.

Desalinasi termal dapat digunakan untuk kondisi air umpan dengan tingginya salinitas, temperatur, dan potensi pengotoran. Sisi lain, ketiga parameter tersebut memberikan masalah bagi desalinasi membran (Greenlee *et al.*, 2009). Hal ini disebabkan bahwa air umpan dengan salinitas tinggi memiliki tingkat pemulihan yang lebih rendah dan akhirnya berdampak pada lebih tingginya konsumsi energi spesifik dari desalinasi termal (Lamei, van der Zaag and von Münch, 2008).

MED merupakan bagian dari desalinasi termal. Hal ini dikarenakan pengaplikasiannya tersusun beberapa "efek" (tahapan) secara seri untuk dua bagian (unit evaporasi – penguapan dan kondensasi). Perihal pertama berkaitan tentang larutan yang akan didistilasi dipanaskan oleh sumber panas hingga melampaui titik didihnya. Kemudian, uap dari larutan tersebut didinginkan di unit kondensasi melalui pembuangan gas ke *heat sink* hingga mengembun. Udara dan gas lainnya dikeluarkan dari bejana (tangki proses). Tekanan yang berada di dalam efeknya ditentukan melalui kesetimbangan fasa gas - cair larutan dan pelarut murni pada suhu ruang (Brogioli, La Mantia and Yip, 2018).

Peneliti (Ortega-Delgado, García-Rodríguez and Alarcón-Padilla, 2017) mengungkapkan bahwa sistem MED memanfaatkan entalpi uap dari unit kondensasi yang dihasilkan dalam satu efek untuk meningkatkan proses evaporasi yang baru untuk efek berikutnya. Setiap efek terdiri dari evaporator film jatuh pada tabung horizontal, demister dan *pre-heater*. Jika dibandingkan MD, MED memiliki stabilitas lebih baik yang mampu mengurangi kebutuhan operasi dan biaya perawatan serta juga lebih baik untuk segi efisiensi energinya (Chen *et al.*, 2021).

Sedangkan diantara teknologi desalinasi termal, MED ditemukan lebih efisien dibandingkan MSF berdasarkan konsumsi energi, efisiensi termal, perpindahan panas yang didapatkan dan spesifikasi kelayakan ekonomi (Wang *et al.*, 2011), (L García-Rodríguez,

2003), (Sen *et al.*, 2011). Dalam risetnya, (Rostamzadeh *et al.*, 2020) dan (H Rostamzadeh, 2021) mengusulkan pabrik MED sebagai pilihan yang tepat untuk desalinasi air laut dikarenakan biaya produksi air yang rendah dan dapat digunakan untuk suhu yang rendah antara 50-70°C sehingga peneliti (Masoud Parsa *et al.*, 2021) melibatkan penggunaan energi terbaharukan sebagai sumber panasnya. Hal yang menjadi pertimbangan bagi pabrik desalinasi skala besar tidak hanya berkaitan tentang kelayakan teknologi yang digunakan, tetapi juga melibatkan permasalahan ekonomi. Aspek kedua ini pada desalinasi air laut mengkaji tentang biaya modal desain proses, biaya operasi, dan beberapa faktor lainnya (saling berhubungan satu sama lain) yang telah menurun secara signifikan selama 10 tahun terakhir (NM Wade, 2001).

MED di masa lalu gagal bersaing akibat dari masalah penskalaan biaya modal (CapEx) dan biaya operasional (*Operating Expenses - OPEX*) yang lebih besar dari MSF (Mezher *et al.*, 2011). Kedua biaya tersebut pada pabrik desalinasi dihitung melalui harga penawaran dari proyek desalinasi komersial dan harga bahan pasar (Mabrouk and Fath, 2015).

Biaya modal secara umum mencakup seluruh pengeluaran yang terkait dengan pelaksanaan proyek kegiatan, dari waktu pengembangan konseptual hingga desain, perizinan, pembiayaan, konstruksi, *commissioning*, dan pengujian penerimaan untuk operasi berkelanjutan. CapEx terdiri atas dua kategori. CapEx (*Direct Capital Cost - DCC*) langsung meliputi biaya investasi peralatan desalinasi, perpipaan, katup, struktur pemasukan air, persiapan lokasi, sistem pembuangan konsentrat, serta peralatan tambahan (seperti: penyimpanan air, sistem tanggap darurat, dan tekniknya). CapEx tidak langsung (*Indirect Capital Cost - ICC*) berupa biaya pengangkutan dan asuransi (~5%), biaya *overhead* kontraktor (~15%), biaya hukum, fiskal, dan administrasi (T Younos, 2005).

Beberapa peneliti di tahun terakhir telah membahas analisis ekonomi desalinasi MED (Goodarzi *et al.*, 2019), (Baniasad Askari and Ameri, 2021), (Palenzuela *et al.*, 2018), tetapi masih rendahnya berkaitan ragam korelasi dalam mengestimasi biaya modal pabrik tersebut. Segmen ini berfokus terhadap kapasitas industri, tahun pendirian, salinitas air umpan, area lokasi (Papapetrou *et al.*, 2017) (Rahimi *et al.*, 2015), (Kosmadakis *et al.*, 2018)

dan luas perpindahan panas (Kosmadakis *et al.*, 2018), (Al-Mutaz and Wazeer, 2015).

## 2. METODOLOGI

Tim penulis memanfaatkan peninjauan ulang literatur (*review article*). Penggunaan ini berupaya untuk identifikasi, evaluasi, dan sintesis pembahasan para peneliti sebelumnya. Dari kajian peneliti yang telah ada, pembahasan mengenai korelasi biaya modal menjadi topik yang menunjang untuk desalinasi. Batasannya berupa teknologi MED, teknologi-ekonomi pabrik MED, korelasi biaya modal spesifik di industri MED (seperti: hubungan biaya modal terhadap kapasitas produksi pabrik, desain luas area alat penukar panas, tahun pembangunan *plant*, kadar garam air umpan, dan region lokasi industri).

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Biaya modal untuk bagian biaya langsung (DCC) menggunakan Persamaan (1). CapEx ini didapatkan dari penjumlahan investasi peralatan, perpipaan, katup, biaya tanah, biaya pengembangan lokasi dan biaya pemasangan.

$$C_{DCC} = C_{MEQ} + C_{AEQ} + C_{LS} + C_{BST} + C_{FST} + C_{UT} + C_{OT} \quad (1)$$

dimana:

$C_{MEQ}$  – *cost of main equipment* (peralatan utama),  $C_{AEQ}$  – *cost of auxiliary equipment* (peralatan pendukung),  $C_{LS}$  – *cost of land and site development* (pembangunan pabrik),  $C_{BST}$  – *cost of brine storage tank* (air salinasi),  $C_{FST}$  – *cost of fresh water storage tank* (air umpan proses),  $C_{UT}$  – *cost of utility* (unit penyediaan utilitas: air, listrik, dan pendukung lainnya),  $C_{OT}$  – *cost of othe direct cost* (biaya langsung lainnya).

Kemudian, biaya tidak langsung (ICC) berada di Persamaan (2) yang umumnya dikalkulasi sebagai persentase dari biaya modal langsung (Sen *et al.*, 2011), (NM Wade, 2001), (Mezher *et al.*, 2011), (Mabrouk and Fath, 2015), (T Younos, 2005), dan (Chen *et al.*, 2018).

$$C_{ICC} = 10\% \times C_{DCC} \quad (2)$$

Total biaya modal (*Capital Cost* – CC) didapatkan melalui Persamaan (3) berikut.

$$C_{CC} = C_{DCC} + C_{ICC} \quad (3)$$

Selain menggunakan persamaan (1-3), langkah lain untuk menentukan biaya modal adalah mengkorelasikan perihal kapasitas,

lokasi, dan tahun pendirian pabrik, parameter salinitas air umpan (Papapetrou *et al.*, 2017), (Rahimi *et al.*, 2015), (Kosmadakis *et al.*, 2018) serta luas area untuk melangsungkan perpindahan panas (Kosmadakis *et al.*, 2018), (Al-Mutaz and Wazeer, 2015).

Perhitungan biaya modal suatu pabrik membutuhkan basis data untuk memudahkan dalam mengakses dan mengembangkan hubungan biaya-biaya yang dikeluarkan oleh perusahaan. Data pangkalan ini secara tanggap akan menimbang berbagai strategi alternatif dan juga menganalisis opsi yang paling kompetitif bagi pabrik desalinasi. *Database* juga dapat berasal dari taksiran biaya sebelumnya (produksi di dalam perusahaan tersebut) maupun didapatkan dari biaya pabrik yang telah ada di berbagai negara. (GW Intelligence, 2022) atau dikenal sebagai *GW Desalting Plant Inventory* Desaldata merupakan pusat data yang umum dimanfaatkan untuk mengestimasi biaya modal industri.

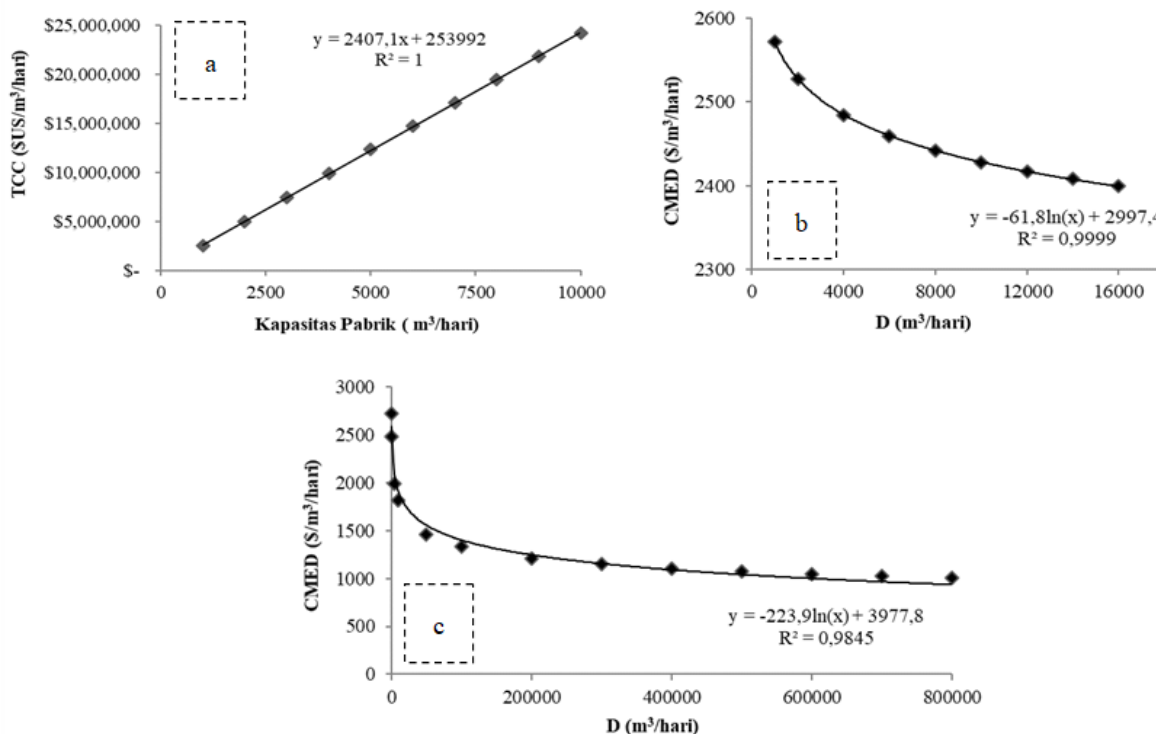
## KORELASI BIAYA MODAL TERHADAP KAPASITAS PABRIK

Hubungan empiris untuk menghubungkan biaya dengan kapasitas telah dikembangkan oleh berbagai peneliti melalui regresi non-linier data pabrik dengan nilai  $R^2$  yang wajar. (Wittholz *et al.*, 2008) merupakan salah satu peneliti yang meninjau data biaya untuk 331 pabrik desalinasi. Kajiannya mencakup periode 1970-2005. Dari sisi teknik desalinasi utama dan penerapan korelasi logaritmik, korelasi biaya ini dapat diterapkan untuk menentukan teknologi desalinasi mana yang paling sesuai dengan situasi yang dihadapi.

Peneliti lainnya yang menggunakan korelasi kapasitas pabrik untuk mengestimasi biaya modal spesifik yaitu (Rahimi *et al.*, 2015). Menurutny, persamaan biaya modal spesifik pabrik diraih melalui pengolahan beberapa data biaya modal pabrik yang telah ada di negara tertentu. Data tersebut dapat berasal dari data pangkalan Desaldata atau *database* lainnya. Pemanfaatan persamaan regresi menjadi langkah pengolahan data tersebut melalui persamaan 4 hingga 6 untuk memprediksi biaya modal pabrik MED.

$$TCC_{MED} (\$/m^3/hari) = \psi_{Dt} = 3054 \times D_t^{0,975} \quad (4)$$

dimana  $D_t$  sebagai laju alir distilat ( $m^3/hari$ ). Hasil pada Gambar 1 memberikan tingkat akurasi sempurna,  $R^2 = 1$  melalui regresi linier.



**Gambar 1. Biaya spesifik MED sebagai fungsi kapasitas pabrik hingga 10.000 m³/hari: penerapan (a) persamaan 4, (b) persamaan 5, dan (c) persamaan (6)**

Gambar 1 mampu menampilkan bahwa penyebaran data (terkait biaya modal pabrik MED) mengantongi fungsi regresi yang dapat diturunkan bagi pabrik MED sebagai fungsi dari kapasitas pabrik harian di wilayah terbatas. Selain itu, Gambar 1 mampu menyiratkan perbandingan lurus antara kapasitas pabriknya terhadap biaya modal yang dibutuhkan. Hal ini terlihat melalui penyorotan kepadatan batas konservatif titik data yang dilibatkan.

Peneliti (Kosmadakis *et al.*, 2018) merujuk kinerja yang sama yaitu (Rahimi *et al.*, 2015). Perbedaannya terletak pada penggunaan persamaan (5) untuk mengestimasi biaya modal pabrik MED.

$$C_{MED}(\$/m^3/hari) = 3054D^{-0,0249} \quad (5)$$

Ketika persamaan (5) diterapkan pada pabrik berkapasitas lebih dari 10.000 m³/hari, biaya spesifik MED tidak mampu mencapai nilai di bawah \$2400/(m³/hari). Hal ini juga dilakukan telah dilakukan peneliti lainnya hingga kapasitas 16.000 m³/hari (Kosmadakis *et al.*, 2018), (Loutatidou and Arafat, 2015), (Palenzuela, Alarcón-Padilla and Zaragoza, 2015), dan (Olwig *et al.*, 2012). Demikian pula penerapan secara bersamaan Persamaan (4) dan (5) dengan kapasitas yang sama (hingga 10.000 m³/hari) memberikan perbedaan nilai *capital*

*cost*. Fenomena ini terjadi dikarenakan pelibatan data biaya modal ditujukan untuk meraih persamaan regresi yang berbeda.

(Kosmadakis *et al.*, 2018) menganalisis lebih lanjut untuk Persamaan (5) melalui penggunaan Desaldata. Kajiannya menghasilkan korelasi numerik baru. Persamaan (6) yang tersaji ditujukan bagi kapasitas pabrik MED sebesar 500 – 800.000 m³/hari.

$$C_{MED} = 6291D^{-0,135} \quad (6)$$

Penerapan Persamaan (5) dan (6) memberikan nilai keakuratan hampir yang berdekatan yaitu 0,999 dan 0,9845 secara logaritmik berturut-turut.

**KORELASI BIAYA MODAL DENGAN LUAS PERPINDAHAN PANAS**

Beberapa literatur menjelaskan bahwa luas perpindahan panas mempengaruhi nilai estimasi biaya modal. (Sharaf, Nafey and García-Rodríguez, 2011) mengatakan bahwa desain pembangkit merupakan salah satu parameter utama yang mempengaruhi biaya yang diestimasi. Biaya modal bertambah seiring peningkatan jumlah efek yang digunakan dan juga dipengaruhi oleh besar atau kecilnya luas perpindahan panas (Palenzuela, Alarcón-Padilla and Zaragoza, 2015), (Aly and El-Fiqi, 2003).

Menurut (Aly and El-Fiqi, 2003), *Top Brine Temperature* - TBT memiliki peran penting atas kebutuhan luas perpindahan panas. Saat TBT divariasikan (dengan jumlah efek yang konstan) akan menampilkan penurunan luas perpindahan panas. Ketika diuji dengan kondisi TBT konstan dan jumlah efek yang divariasikan memberikan dampak peningkatan luas perpindahan panas. (Al-Mutaz and Wazeer, 2015) turut menambahkan bahwa pentingnya perhatian terhadap jumlah efek yang optimum. Hal ini didasari ketika jumlah efek berada di atas nilai optimumnya maka ketidakefisienan juga akan berdampak ke sisi biaya energi dan juga biaya investasi.

Temuan (Kosmadakis *et al.*, 2018) mengkorelasikan desain *heat exchanger* seperti jumlah efek, ukuran, dan luas area perpindahan panasnya untuk mengestimasi biaya modal spesifik pabrik MED. Untuk suhu sumber panas yang sama, jumlah efek yang lebih tinggi menunjukkan peningkatan biaya modal spesifiknya. Hal ini disebabkan oleh peningkatan jumlah efek berbanding lurus dengan luas area perpindahan panasnya.

#### KORELASI BIAYA MODAL DENGAN TAHUN PABRIK DIBANGUN

Umur pabrik (t) merupakan jumlah tahun yang terlibat pada arus kas di masa depan (turut berperan). Menurut (Papapetrou *et al.*, 2017), usia industri dibutuhkan untuk mengevaluasi kelayakan proyek desalinasi yang disajikan oleh Persamaan (7) berikut.

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{R_t - C_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad (7)$$

NPV atau *Net Present Value* (NPV) berpotensi untuk mengetahui investasi modal awal,  $I_0$ , dengan pendapatan dan biaya pada tahun t ( $R_t$  dan  $C_t$  berturut-turut) dari tahun pertama hingga terakhir (n).

Perkiraan untuk biaya rata-rata konsumsi air juga memerlukan umur pabrik. Hal ini disebabkan bahwa pemilihan harga jual air dan evolusinya dari waktu ke waktu bergantung pada kondisi pasar selama periode 20 hingga 30 tahun. Tujuannya adalah pabrik mampu beroperasi tanpa membutuhkan biaya yang besar. Umur pabrik umumnya ditentukan oleh pengambil keputusan, seseorang atau sekumpulan pihak yang harus menetapkan periode waktu. *Timeline* ini ditujukan untuk

mengkalkulasi laba atas investasi di pabrik MED serta juga menimbang kendala teknis pabrik dan komponennya. Menurut (Loutatidou *et al.*, 2014), waktu merupakan variabel independen yang menggabungkan fenomena perubahan internal dan eksternal selama di industri desalinasi. Contoh perubahan dari lingkungan luar yang mampu memberikan dampak signifikan bagi biaya CapEx ini adalah nilai tukar mata uang terhadap harga impor bahan baku dan peralatan.

#### KORELASI BIAYA MODAL DENGAN SALINITAS AIR UMPAN

Mengenai fasilitas desalinasi, biaya modal telah dievaluasi melalui pemanfaatan nilai spesifik rata-rata yang ditetapkan ke \$3100/(m<sup>3</sup>/hari) untuk MED (Iaquaniello *et al.*, 2014). Pengaruh salinitas air umpan pada perhitungan (misalnya pada permukaan penukar panas) dapat diabaikan. Hal ini ditujukan untuk tipikal kisaran air laut yang kerap berada dalam aspek pertimbangan (dari 32.000 hingga 40.000 ppm). Parameter ini merupakan salinitas rata-rata antara nilai Mediterania dan Teluk Arab. Oleh karena itu, segmen ini tidak dilibatkan dalam korelasi yang dihasilkan (Kosmadakis *et al.*, 2018).

Dalam korelasi biaya modal dengan salinitas air umpan, temperatur umpan memegang peranan penting dalam keputusan pemilihan proses. Proses termal lebih menyukai suhu umpan yang lebih rendah. Hal ini mampu menghasilkan *driving force* yang lebih baik dimana adanya perbedaan suhu yang lebih tinggi antara uap dan air umpan (Bhojwani *et al.*, 2019). Untuk rasio tinggi kinerjanya, MED dapat bersaing dengan RO terutama pada umpan air dengan salinitas tinggi (Ihm *et al.*, 2016).

#### KORELASI BIAYA MODAL DENGAN REGION TEMPAT PABRIK DIBANGUN

Lokasi pembangunan pabrik MED akan memberikan pengaruh pada harga tanah yang termasuk ke dalam DCC. Biaya modal yang dibutuhkan untuk setiap lokasi pabrik desalinasi di beberapa negara bervariasi. Perbedaannya memberikan sedikit efek yang cukup besar pada biaya kumulatif dari setiap pabrik desalinasi. Sebagai contoh, pabrik MED di daerah Middle East, di kota Abu Dhabi, Uni Emirat Arab. Pabrik di lokasi ini berkapasitas 500 m<sup>3</sup>/hari dengan menggunakan bahan bakar diesel. Biaya yang dibutuhkan sebesar \$2000/m<sup>2</sup>. Ketika

energinya adalah surya maka biayanya sebesar \$200 - 400/m<sup>2</sup> (AM El-Nashar, 2001).

Lokasi pabrik MED ditentukan untuk mendesain ukuran medan surya dan aliran suhu yang sesuai dengan refrigerasi yang dipilih (Palenzuela *et al.*, 2015). Selain itu, lokasi industri desalinasi yang dipilih juga seringkali berdampak pada biaya operasional dan biaya modal. Hal ini disebabkan oleh perbedaan biaya tenaga kerja dan harga tanah. Namun, harga biaya air mampu menunjukkan bahwa perbedaan lokasi pabrik memberikan kontribusi pengaruh sangat kecil. Oleh karena itu, data biaya yang berada di beberapa negara dapat diterapkan di lokasi manapun (Wittholz *et al.*, 2008). Contoh studi kasus lainnya yaitu pabrik desalinasi MED di Bandar Abbas, (Masoud Parsa *et al.*, 2021). Harga tanah di lokasi ini untuk membangun pabrik MED adalah nol atau gratis. Hal ini disebabkan oleh kondisi lokasi geografis negara dengan berlahan luas. Dampaknya adalah total estimasi biaya modal untuk MED sekitar \$1207/(m<sup>3</sup>/hari) dengan kapasitas produksi 20.000 m<sup>3</sup>/tahun.

#### 4. KESIMPULAN

Metodologi estimasi biaya modal patut diterapkan untuk perencanaan dan penganggaran proyek serta sebagai studi kelayakan. Keberadaan perkiraan nilai biaya modal pabrik, perancang dapat dengan cepat menimbang berbagai macam strategi alternatif, dan menganalisis opsi yang paling kompetitif. Estimasi biaya modal dapat dilakukan melalui metode korelasi dengan didukung adanya regresi biaya modal dan kapasitas pabrik MED yang telah ada di negara tertentu. Selain itu, peran biaya modal spesifik juga turut menghubungkan jumlah efek terhadap area perpindahan panas. Hal ini mengakibatkan biaya modal menyandang berbanding lurus terhadap dua aspek tersebut. Ragamnya estimasi biaya modal untuk setiap pabrik desalinasi di beberapa negara disebabkan oleh faktor biaya tanah, tahun pendirian industri, biaya pengembangan lokasi, biaya peralatan produksi beserta instalansi.

#### DAFTAR PUSTAKA

Abdelshafy, A.M., Hassan, H. and Jurasz, J. (2018) 'Optimal design of a grid-connected desalination plant powered by renewable energy resources using a hybrid PSO-GWO approach', *Energy Conversion and Management*, 173, pp. 331–347. Available

at:  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.083>.

- Al-Mutaz, I.S. and Wazeer, I. (2015) 'Economic optimization of the number of effects for the multieffect desalination plant', *Desalination and Water Treatment*, 56, pp. 2269–2275. Available at: <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.960468>.
- Al-Obaidi, M.A. *et al.* (2018) 'Performance analysis of a medium-sized industrial reverse osmosis brackish water desalination plant', *Desalination*, 443, pp. 272–284. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.06.010>.
- Aly, N.H. and El-Fiqi, A.K. (2003) 'Thermal performance of seawater desalination systems', *Desalination*, 158, pp. 127–142.
- Baniasad Askari, I. and Ameri, M. (2021) 'A techno-economic review of multi effect desalination systems integrated with different solar thermal sources', *Applied Thermal Engineering*, 185, p. 116323. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116323>.
- Bhojwani, S. *et al.* (2019) 'Technology review and data analysis for cost assessment of water treatment systems', *Science of The Total Environment*, 651, pp. 2749–2761. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.363>.
- Broglioli, D., La Mantia, F. and Yip, N.Y. (2018) 'Thermodynamic analysis and energy efficiency of thermal desalination processes', *Desalination*, 428, pp. 29–39. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.010>.
- Chen, Q. *et al.* (2018) 'Energy, economic and environmental (3E) analysis and multi-objective optimization of a spray-assisted low-temperature desalination system', *Energy*, 151, pp. 387–401. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.051>.
- Chen, Q. *et al.* (2021) 'A zero liquid discharge system integrating multi-effect distillation and evaporative crystallization for desalination brine treatment', *Desalination*, 502, p. 114928. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114928>.
- Chen, X. *et al.* (2016) 'RO applications in China: History, current status, and driving

- forces', *Desalination*, 397, pp. 185–193. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.07.001>.
- Eke, J. *et al.* (2020) 'The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity', *Desalination*, 495, p. 114633. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114633>.
- El-Nashar, A.M. (2001) 'The economic feasibility of small solar MED seawater desalination plants for remote arid areas', *Desalination*, 134, pp. 173–186. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00124-2](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00124-2).
- García-Rodríguez, L. (2003) 'Renewable energy applications in desalination: state of the art', *Solar Energy*, 75, pp. 381–393. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.08.005>.
- Goodarzi, S. *et al.* (2019) 'Techno-economic evaluation of a multi effect distillation system driven by low-temperature waste heat from exhaust flue gases', *Desalination*, 460, pp. 64–80. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.03.005>.
- Greenlee, L.F. *et al.* (2009) 'Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges', *Water Research*, 43, pp. 2317–2348. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.010>.
- Iaquaniello, G. *et al.* (2014) 'Concentrating solar power (CSP) system integrated with MED–RO hybrid desalination', *Desalination*, 336, pp. 121–128. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.12.030>.
- Ihm, S. *et al.* (2016) 'Energy cost comparison between MSF, MED and SWRO: Case studies for dual purpose plants', *Desalination*, 397, pp. 116–125. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.06.029>.
- Intelligence, G.W. (2022) *Desal data, desaldata.com*. Available at: <https://www.desaldata.com/>.
- Jones, E. *et al.* (2019) 'The state of desalination and brine production: A global outlook', *Science of The Total Environment*, 657, pp. 1343–1356. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>.
- Kosmadakis, G. *et al.* (2018) 'Correlations for estimating the specific capital cost of multi-effect distillation plants considering the main design trends and operating conditions', *Desalination*, 447, pp. 74–83. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.09.011>.
- Lamei, A., van der Zaag, P. and von Münch, E. (2008) 'Impact of solar energy cost on water production cost of seawater desalination plants in Egypt', *Energy Policy*, 36, pp. 1748–1756. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.12.026>.
- Lin, S. and Elimelech, M. (2015) 'Staged reverse osmosis operation: Configurations, energy efficiency, and application potential', *Desalination*, 366, pp. 9–14. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.02.043>.
- Loutatidou, S. *et al.* (2014) 'Capital cost estimation of RO plants: GCC countries versus southern Europe', *Desalination*, 347, pp. 103–111. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.05.033>.
- Loutatidou, S. and Arafat, H.A. (2015) 'Techno-economic analysis of MED and RO desalination powered by low-enthalpy geothermal energy', *Desalination*, 365, pp. 277–292. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.03.010>.
- Mabrouk, A.N. and Fath, H.E.S. (2015) 'Technoeconomic study of a novel integrated thermal MSF–MED desalination technology', *Desalination*, 371, pp. 115–125. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.05.025>.
- Masoud Parsa, S. *et al.* (2021) 'Thermodynamic, economic, and sensitivity analysis of salt gradient solar pond (SGSP) integrated with a low-temperature multi effect desalination (MED): Case study, Iran', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, p. 101478. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101478>.
- Mezher, T. *et al.* (2011) 'Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies', *Desalination*, 266, pp. 263–273. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.08.035>.
- Olwig, R. *et al.* (2012) 'Techno-economic analysis of combined concentrating solar power and desalination plant configurations in Israel and Jordan', *Desalination and Water Treatment*, 41, pp. 9–25. Available at: <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.664674>.



- Ortega-Delgado, B., García-Rodríguez, L. and Alarcón-Padilla, D.-C. (2017) 'Opportunities of improvement of the MED seawater desalination process by pretreatments allowing high-temperature operation', *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 97, pp. 94–108. Available at: <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21679>.
- Palenzuela, P. *et al.* (2015) 'Comparison between CSP+MED and CSP+RO in Mediterranean Area and MENA Region: Techno-economic Analysis', *Energy Procedia*, 69, pp. 1938–1947. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.192>.
- Palenzuela, P. *et al.* (2018) 'Techno-economic assessment of a multi-effect distillation plant installed for the production of irrigation water in Arica (Chile)', *Science of The Total Environment*, 643, pp. 423–434. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.183>.
- Palenzuela, P., Alarcón-Padilla, D.-C. and Zaragoza, G. (2015) 'Large-scale solar desalination by combination with CSP: Techno-economic analysis of different options for the Mediterranean Sea and the Arabian Gulf', *Desalination*, 366, pp. 130–138. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.037>.
- Papapetrou, M. *et al.* (2017) 'Assessment of methodologies and data used to calculate desalination costs', *Desalination*, 419, pp. 8–19. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.05.038>.
- Rahimi, B. *et al.* (2015) 'Thermo-economic analysis of two novel low grade sensible heat driven desalination processes', *Desalination*, 365, pp. 316–328. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.03.008>.
- Rostamzadeh, H. *et al.* (2020) 'Performance enhancement of a conventional multi-effect desalination (MED) system by heat pump cycles', *Desalination*, 477, p. 114261. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114261>.
- Rostamzadeh, H. (2021) 'A new pre-concentration scheme for brine treatment of MED-MVC desalination plants towards low-liquid discharge (LLD) with multiple self-superheating', *Energy*, 225, p. 120224. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120224>.
- Semiat, R. (2008) 'Energy Issues in Desalination Processes', *Environmental Science & Technology*, 42(22), pp. 8193–8201. Available at: <https://doi.org/10.1021/es801330u>.
- Sen, P.K. *et al.* (2011) 'A small scale Multi-effect Distillation (MED) unit for rural micro enterprises: Part I—design and fabrication', *Desalination*, 279, pp. 15–26. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.11.003>.
- Sharaf, M.A., Nafey, A.S. and García-Rodríguez, L. (2011) 'Exergy and thermo-economic analyses of a combined solar organic cycle with multi effect distillation (MED) desalination process', *Desalination*, 272, pp. 135–147. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.01.006>.
- Wade, N.M. (2001) 'Distillation plant development and cost update', *Desalination*, 136, pp. 3–12. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00159-X](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00159-X).
- Wang, X. *et al.* (2011) 'Low grade heat driven multi-effect distillation technology', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, pp. 5497–5503. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.07.041>.
- Wenten, I.G. and Khoiruddin (2016) 'Reverse osmosis applications: Prospect and challenges', *Desalination*, 391, pp. 112–125. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.12.011>.
- Wittholz, M.K. *et al.* (2008) 'Estimating the cost of desalination plants using a cost database', *Desalination*, 229, pp. 10–20. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.07.023>.
- Younos, T. (2005) 'The Economics of Desalination', *Journal of contemporary water research & education*, 132, pp. 39–45.
- , K., Kato, K., and Chen, N., (1997), Wear Map of Ceramics, *Wear*, 203, pp. 291–301.
- Anonimus. *Renewable Energy*. [www.guardian.co.uk](http://www.guardian.co.uk). Diakses: 28 Juni 2012, jam 13.30.
- Blau, P.J., (2009), *Friction Science and Technology: From Concepts to Applications*, 2<sup>nd</sup> Ed., CRC Press, New York, pp. 183-219.
- Hovmand, S., (1995), Fluidized Bed Drying, in Mujumdar, A.S. (Ed.). *Handbook of*



*Industrial Drying*, 2<sup>nd</sup> Ed., Marcel Dekker, New York, pp. 195-248.

Hsu, S.M. and Shen, M.C., (2005), Wear Mapping of Materials, in Stachowiak, G.W. (Ed.). *Wear - Materials, Mechanisms and Practice*, John Wiley & Sons, London, pp. 369-423.

Pasaribu, H.R., (2005), Friction and Wear of Zirconia and Alumina Ceramics Doped with CuO, *PhD Thesis*, University of Twente, Enschede, Netherlands.

Primack, H.S., (1983), Method of Stabilizing Polyvalent Metal Solutions, *U.S. Patent No. 4,373,104*