

Review: Pemanfaatan Vakum pada Solar *Still* dalam Proses Laju Penguapan Air Laut untuk Pengaplikasian Desalinasi Kolam Garam

Irfan Maulana Yusuf, & Dan Mugisidi

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka Alamat: Jalan Tanah Merdeka No. 6, Kp. Rambutan, Ps. Rebo, Jakarta Timur. Telp. (021)840094 Fax. (021)87782739

E-mail: irfanmaulana57580@gmail.com, Corresponden author: dan.mugisidi@uhamka.ac.id

Abstrak

Vakum merupakan kondisi tekanan udara yang lebih rendah dari tekanan atmosfer dan memiliki pengaruh signifikan terhadap proses perubahan fase cair menjadi uap. Tekanan vakum memiliki pengaruh langsung terhadap peningkatan laju penguapan air laut dengan menurunkan titik didih sehingga proses evaporasi dapat berlangsung pada suhu rendah. Kajian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh tekanan vakum terhadap laju penguapan air laut untuk pengaplikasian pada sistem desalinasi kolam garam. Metode yang digunakan adalah studi literatur dari berbagai jurnal yang membahas penerapan vakum pada proses desalinasi air laut. Hasil kajian menunjukkan bahwa penurunan tekanan secara signifikan mempercepat laju penguapan dan mengurangi kebutuhan energi panas. Penerapan tekanan vakum dinilai efektif untuk meningkatkan kinerja dan efisien dibandingkan sistem bertekanan atmosfer serta kajian ini dapat memberikan pengembangan sistem desalinasi yang hemat energi dan dapat berpotensi diterapkan di wilayah pesisir.

Kata kunci: vakum, desalinasi, penguapan, energi surya, kolam garam.

Abstract

Vacuum is a condition of air pressure lower than atmospheric pressure and has a significant influence on the process of changing the liquid phase to vapor. Vacuum pressure has a direct influence on increasing the rate of seawater evaporation by lowering the boiling point so that the evaporation process can occur at a low temperature. This study aims to analyze the effect of vacuum pressure on the rate of seawater evaporation for application in a salt pond desalination system. The method used is a literature review from various journals discussing the application of vacuum in the seawater desalination process. The results of the study indicate that reducing pressure significantly accelerates the rate of evaporation and reduces the need for heat energy. The application of vacuum pressure is considered effective in improving performance and efficiency compared to atmospheric pressure systems. This study can provide the development of an energy-efficient desalination system that can be potentially applied in coastal areas

Keyword: vacuum, desalination, evaporation, solar energy, salt ponds.

1 PENDAHULUAN

Kebutuhan akan air bersih terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk, aktivitas industri, dan perubahan iklim yang mempengaruhi ketersediaan sumber air tawar, terutama di wilayah pesisir. Air adalah salah satu sumber daya yang penting untuk kehidupan, sekitar 97% adalah air asin di lautan, dan sisanya 3 % yaitu air tawar dari air tanah, danau, dan Sungai [1]. Pada daerah pesisir sebenarnya sangat banyak tersedia air yakni air laut, karena air laut mempunyai rasa yang asin, maka tidak dapat digunakan langsung untuk kebutuhan rumah tangga. Rasa asin ini dipengaruhi karena adanya kandungan garam dengan konsentrasi garam terlarut yang tinggi [2]. Penggaraman rakyat sampai saat ini menggunakan sistem kristalisasi total sehingga

kualitasnya masih kurang. Pada umumnya kadar NaClnya kurang dari 90% dan banyak mengandung pengotor. Luas lahan penggaraman rakyat 25.542 Ha atau sekitar 83,31% dari luas areal penggaraman nasional [3]. Desalinasi menjadi salah satu solusi potensial untuk mengonversi air laut menjadi air tawar. Desalinasi merupakan proses air laut yang telah dipanaskan, sehingga menyebabkan pemisahan yang terjadi dari unsur-unsur yang terkandung didalamnya, seperti kotoran pada air laut yang akan terpisah lalu menjadi uap air, uap air tersebut akan di dinginkan sehingga menjadi tetesan air destilat (*fresh water*) [4]. Solusi menarik yang dapat dimanfaatkan untuk aplikasi desalinasi adalah pemanfaatan energi surya. Sistem evaporasi surya memang memiliki kapasitas produksi yang rendah dan waktu operasi terbatas. Namun dengan hal ini, energi matahari

menjadi alternatif yang potensial agar bisa dimanfaatkan dalam sistem ini, terutama di Indonesia, yang memiliki intensitas matahari yang melimpah [5]. Dengan ini suatu hal yang menjanjikan untuk masalah kelangkaan air di daerah pedesaan terpencil atau di pesisir pantai dengan kurangnya pasokan energi berkelanjutan yang memadai [6]. Namun, teknologi desalinasi konvensional umumnya masih memiliki kelemahan berupa kebutuhan energi panas yang tinggi dan biaya operasional yang besar. Proses desalinasi melalui dua tahap yaitu penguapan dan kondensasi dibantu dengan energi panas pada *heater plate* dan sistem vakum. Salah satu metode sederhana yang banyak digunakan di Indonesia adalah sistem desalinasi kolam garam, yang mengandalkan energi matahari sebagai sumber panas utama [4], [7], [8]. Humidifikasi dehumidifikasi adalah dasar dari teknik desalinasi surya termal [9]. Dalam teknik ini, air laut yang terkena panas matahari akan menguap. Setelah itu, dikondensasikan melalui unit dehumidifier terpisah atau dengan capaian yang lebih dingin, seperti halnya dalam desalinasi [9]. Dalam kondisi ini menyebabkan laju penguapan berjalan lambat, terutama pada saat intensitas radiasi matahari rendah, seperti pada musim hujan atau saat cuaca berawan [10], [11]. Penggunaan dengan energi matahari dipilih karena mempunyai ketersediaan yang banyak dan tak terbatas. Mengingat alat desalinasi ini pada prosesnya memerlukan energi yang bertemperatur tinggi serta intensitas yang cukup banyak [12], [13]. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang lebih efisien dalam proses penguapan air laut, salah satunya melalui penerapan menggunakan energi matahari dan tekanan vakum.

Penggunaan vakum pada alat desalinasi bertujuan membantu mempercepat penguapan atau evaporasi [4], [13]. Tekanan vakum berperan penting dalam mempercepat proses penguapan dengan menurunkan titik didih air. Desalinasi dengan proses distilasi vakum memerlukan ruangan dengan tekanan udara yang lebih rendah dari tekanan atmosfer. Kondisi ruangan vakum akan membantu proses penguapan menjadi lebih cepat [14], [15]. Penerapan sistem vakum dalam desalinasi merupakan langkah inovatif yang menandai perubahan signifikan dari metode konvensional [16]. Teknologi ini mempunyai prospek besar untuk meningkatkan kinerja sistem secara keseluruhan, terutama dengan mempercepat laju penguapan dan meningkatkan efisiensi proses desalinasi [7]. Hal ini berpotensi mengurangi konsumsi energi panas dan meningkatkan efisiensi termal sistem desalinasi, terutama pada sistem kolam garam yang memanfaatkan energi surya sebagai sumber panas utama, diperlukan upaya untuk mempercepat laju penguapan dengan cara

menurunkan kebutuhan energi panas tanpa mengurangi efektivitas proses pemisahan air laut [17]. Maka ini dinilai relevan untuk diterapkan di daerah tropis yang memiliki intensitas radiasi matahari tinggi sepanjang tahun.

Beberapa jumlah teknologi pada desalinasi banyak yang sudah dikembangkan diantaranya, *Reverse Osmosis (RO)*, *Thermal Vapor Compression (TVC)*, *Mechanical vapor compression (MVC)*, *multi-stage flash distillation (MSF)*, *multi effect distillation (MED)* dan *Vacuum Desalination (VD)* [18]. Berbagai hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penerapan tekanan vakum mampu meningkatkan laju penguapan air laut secara signifikan dan mengoptimalkan proses desalinasi pada berbagai skala [19]. Meskipun demikian, masih terdapat tantangan teknis seperti kebutuhan energi tambahan untuk potensi kebocoran dan stabilitas tekanan dalam ruang evaporasi [20]. Studi literatur ini penting dilakukan karena sebagian besar penelitian desalinasi di Indonesia masih berfokus pada peningkatan efisiensi kolektor surya dan desain alat. Tekanan atmosfer yang rendah juga mempengaruhi pola kristalisasi garam. Dalam kondisi tekanan rendah, laju evaporasi meningkat, mempercepat proses kristalisasi. Namun, tekanan yang terlalu rendah dapat menyebabkan pembentukan kristal yang tidak homogen [21]. Penerapan sistem vakum dapat menjadi solusi alternatif untuk meningkatkan efisiensi proses desalinasi tanpa menambah kebutuhan energi panas secara signifikan. Selain itu, kajian ini juga relevan untuk mendukung pengembangan teknologi pengolahan air laut yang ramah lingkungan dan hemat energi, sejalan dengan peningkatan kebutuhan air bersih dan penguatan sektor industri garam nasional. Oleh karena itu, diperlukan kajian literatur yang komprehensif untuk memahami secara mendalam hubungan antara tekanan vakum, efisiensi energi, dan kinerja penguapan dalam sistem desalinasi berbasis kolam garam.

Teknologi desalinasi vakum merupakan salah satu hal inovatif dalam proses pemisahan garam dari air laut, yang memanfaatkan prinsip dasar termodinamika antara tekanan dan titik didih cairan. Penurunan tekanan digunakan untuk menurunkan titik didih cairan agar lebih rendah daripada titik didih air biasa pada tekanan normal yaitu 1 atm. Sehingga tanpa memerlukan suhu yang tinggi, penguapan akan tetap berlangsung [13], [22]. Dalam konteks desalinasi, maka air laut tidak perlu dipanaskan hingga 100°C untuk menguap, karena pada kondisi vakum, air dapat mendidih pada suhu sekitar 45–70°C saja. Penurunan kebutuhan suhu pemanasan ini menghasilkan penghematan energi termal yang

signifikan serta memungkinkan penggunaan energi panas bersuhu rendah, seperti energi surya atau panas limbah industri, sebagai sumber utama pemanas sistem [23], [6].

Penerapan tekanan vakum pada sistem desalinasi secara langsung meningkatkan laju penguapan air laut dan memperbesar volume air tawar hasil kondensasi [15]. Dalam penelitian tersebut, sistem desalinasi dengan tekanan 1–2 inHg (sekitar 3–7 kPa) menunjukkan peningkatan laju penguapan hingga 30–40% dibandingkan dengan sistem yang beroperasi pada tekanan atmosferik [4]. Hal ini terjadi karena penurunan tekanan menyebabkan molekul air lebih mudah melepaskan diri dari permukaan cairan menjadi uap, sehingga proses transisi fase cair–gas berlangsung lebih cepat meskipun suhu air relatif rendah [7].

Selain itu, sistem vakum juga mengurangi kehilangan energi panas laten yang biasanya terjadi pada proses penguapan konvensional. Dalam kondisi tekanan rendah, energi yang dibutuhkan untuk mengubah air menjadi uap menurun, sehingga efisiensi termal sistem meningkat. Prinsip ini banyak dimanfaatkan dalam berbagai teknologi desalinasi modern seperti *Vacuum Multi-Effect Distillation (V-MED)*, *Multi-Stage Flash (MSF)*, dan *Vacuum Membrane Distillation (VMD)*, di mana tekanan vakum diterapkan pada ruang evaporasi untuk mempercepat laju penguapan dan memperbaiki kinerja kondensasi [14].

Sistem penyuling surya tipe kolektor tabung vakum menunjukkan bahwa penggunaan tekanan rendah tidak hanya meningkatkan laju penguapan, tetapi juga meningkatkan kualitas destilat karena mengurangi potensi *carry-over* (terbawanya partikel garam ke dalam uap air) [4], [24]. Hasil uji menunjukkan bahwa sistem vakum menghasilkan air tawar dengan salinitas lebih rendah dibandingkan sistem konvensional, yang menandakan proses pemisahan garam berlangsung lebih sempurna.

Secara fisik, kinerja sistem desalinasi berbasis vakum sangat dipengaruhi oleh hubungan antara tekanan, suhu, dan laju perpindahan panas di dalam ruang evaporasi dan kondensasi. Penurunan tekanan di dalam sistem menyebabkan titik didih air turun secara signifikan, sehingga proses penguapan dapat terjadi pada suhu yang lebih rendah dibandingkan dengan kondisi atmosferik [22]. Hal ini mempercepat laju perpindahan uap air dari zona evaporasi menuju kondensor. Dalam tahap kondensasi, uap air yang telah berpindah akan mengalami pendinginan dan berubah kembali menjadi fase cair melalui proses pelepasan panas laten kondensasi. Energi panas yang dilepaskan ini dapat dimanfaatkan kembali untuk memanaskan air garam pada tahap sebelumnya,

sehingga meningkatkan efisiensi termal sistem secara keseluruhan [25].

Kelebihan lain dari sistem desalinasi berbasis vakum adalah penurunan potensi fouling dan scaling. Karena sistem bekerja pada suhu yang relatif rendah, risiko pengendapan garam atau kerak mineral di dinding alat menjadi lebih kecil dibandingkan sistem dengan suhu tinggi seperti MSF konvensional. Hal ini tidak hanya memperpanjang umur peralatan, tetapi juga menurunkan kebutuhan perawatan rutin [26][27].

Secara keseluruhan, penerapan teknologi vakum dalam proses desalinasi menawarkan kombinasi antara efisiensi energi, kualitas air hasil tinggi, dan fleksibilitas operasi. Keunggulan-keunggulan ini menjadikan desalinasi vakum sebagai salah satu teknologi paling menjanjikan untuk diterapkan di daerah kering dan pesisir dengan intensitas radiasi matahari tinggi seperti di Indonesia. Integrasi antara sistem vakum dan energi terbarukan, seperti yang diteliti Yusuf et al. [4], membuktikan bahwa hal ini mampu menghasilkan air tawar yang layak konsumsi secara berkelanjutan tanpa ketergantungan besar pada sumber energi fosil.

Pada kajian ini membahas tentang beberapa vakum desalinasi yang sering digunakan yaitu *Vacuum Multi-Effect Distillation (V-MED)*, *Multi-Stage Flash (MSF)*, dan *Vacuum Membrane Distillation (VMD)*.

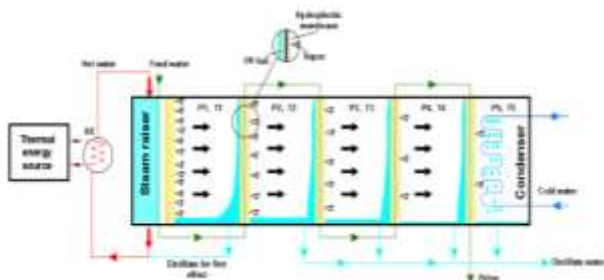
2 VACUUM MULTI-EFFECT DISTILLATION (V-MED)

Vacuum Multi-Effect Distillation (V-MED) merupakan pengembangan dari sistem *Multi-Effect Distillation (MED)* konvensional, di mana prinsip utamanya adalah pemanfaatan kembali energi panas (*heat recovery*) dalam serangkaian proses penguapan bertingkat (*multi-effect*) yang berlangsung di bawah kondisi tekanan rendah (vakum).

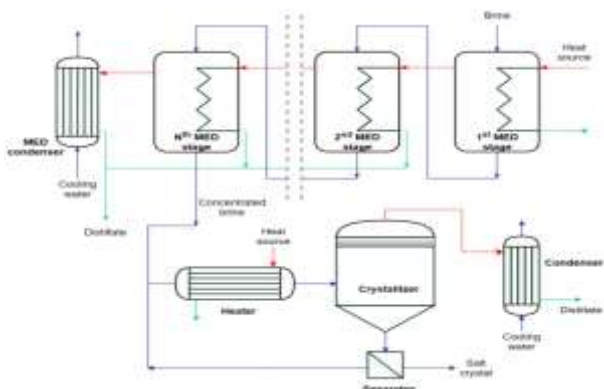
Desalinasi multi-efek merupakan salah satu sistem desalinasi termal yang signifikan karena efisiensinya yang tinggi, kesederhanaan operasional serta peawatannya dan kelayakan penggunaan panas berkadar rendah [28]. Sistem Distilasi Multi-Efek (MED) dirancang untuk mencapai efisiensi energi yang tinggi melalui prinsip pemanfaatan panas secara berulang dan operasi vakum. Dalam sistem ini, air laut dipanaskan di ruang evaporasi pertama hingga mencapai suhu tertentu, namun suhu ini tetap berada di bawah titik didih normal air karena tekanan di dalam sistem dijaga lebih rendah daripada tekanan atmosfer [29].

Pengaturan tekanan vakum ini sangat krusial, karena memungkinkan air laut untuk menguap pada

suhu yang jauh lebih rendah (sekitar 50–70°C), sehingga proses ini jauh lebih hemat energi dibandingkan pemanasan hingga 100°C pada tekanan normal. Uap air yang dihasilkan dari tahap pertama kemudian dialirkan ke penukar panas di tahap berikutnya, di mana ia dikondensasikan menjadi air bersih (distilat), sambil melepaskan panas laten kondensasi. Panas laten yang dilepaskan inilah yang kemudian dimanfaatkan sebagai sumber energi untuk menguapkan air laut baru di tahap berikutnya, yang beroperasi pada suhu dan tekanan yang semakin menurun, memungkinkan siklus pemanfaatan energi panas secara berantai di setiap efek. [29], [30].



Gambar 1 Diagram skematik yang menunjukkan prinsip V-MED [29]



Gambar 2 Diagram skematis mengintegrasikan MED dan kristalisasi evaporatif [30].

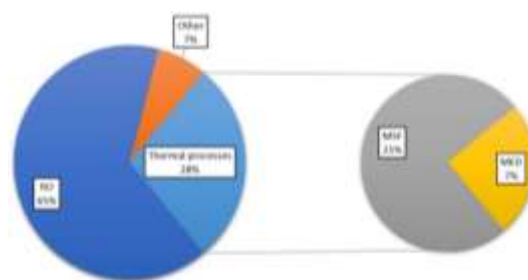
Dalam sistem Distilasi Multi-Efek (MED), panas dimanfaatkan secara berulang. Uap yang dihasilkan dari efek sebelumnya (tahap 1) diarahkan untuk memanaskan dan menguapkan sebagian air garam umpan di efek berikutnya (tahap 2). Karena efek kedua beroperasi pada tekanan lebih rendah, uap dari tahap pertama dapat terkondensasi dan mentransfer panas latennya untuk memicu penguapan air garam baru, sehingga kristal garam padat dipisahkan dari bubur air garam, sementara uap yang dihasilkan di kondensasikan dalam kondensor eksternal untuk menjaga kondisi vakum [30]. Setelah masuk ke beberapa tahap kemudian penggunaan air umpan memfasilitasi kondensasi uap air yang dihasilkan di dalam kondensor. Jumlah tahap yang digunakan

dalam proses MED menentukan laju produksi air tawar.

Pengaturan suhu dan tekanan uap air dalam proses MED dicapai dengan memasang kompresor uap termal atau kompresor uap mekanis. Penerapan kompresi uap sangat mempunyai peran penting dalam meningkatkan kinerja proses MED. Proses MED menawarkan beberapa keuntungan, termasuk efisiensi biaya dalam hal peralatan, material, perawatan, dan konsumsi energi yang rendah. Selain itu, teknologinya yang sederhana memungkinkannya bersaing secara efektif dengan metode desalinasi lainnya. Kisaran suhu operasi untuk proses MED biasanya berkisar antara 70°C dan 80°C, sehingga kompatibel dengan sumber energi terbarukan. Pilihan energi terbarukan seperti panel surya dan sumber panas bumi sangat cocok untuk mendukung proses MED melakukan studi perbandingan antara energi fosil dan energi surya, dengan fokus pada manfaat ekonomi sistem MED. Dibandingkan dengan sumber energi konvensional, proses MED mengonsumsi lebih banyak energi [30][31][32].

3 MULTI-STAGE FLASH (MSF)

Distilasi Membran Vakum Multi-Efek (V-MED) memang hemat energi dengan beroperasi pada suhu rendah (sekitar 50–70°C) dan meminimalkan masalah melalui pemanfaatan membran dan kondisi vakum. Teknologi *Multi Stage Flash (MSF)* merupakan tipe proses destilasi termal, di mana air tawar dipisahkan dari air garam lewat penguapan [33].



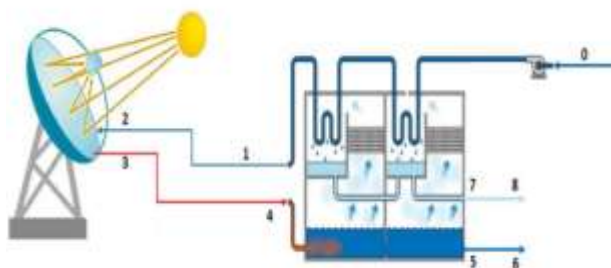
Gambar 3 Distribusi teknologi desalinasi [34].

Teknologi termal lain yang telah lama dominan dalam skala besar adalah *Multi-Stage Flash (MSF)*, yang mengandalkan prinsip *flashing* dalam air laut secara berurutan pada tekanan yang semakin menurun untuk menghasilkan uap air dengan suhu yang lebih tinggi [26], [34].

Di antara sistem desalinasi berbasis termal, desalinasi MSF masih menjadi proses desalinasi yang dominan di Negara-Negara Timur Tengah, khususnya Qatar dan Arab Saudi karena ketahanan, keandalan, dan kemampuannya untuk mengolah air

laut bersalinitas tinggi dengan proses pasca-pengolahan yang minimal [26]. *Flash* desalinasi adalah proses distilasi termal yang menguntungkan berdasarkan fenomena fisik *flash* penguapan [35]. Di antara beragam teknologi desalinasi yang tersedia, metode *Multi-Stage Flash (MSF)* secara historis mempunyai peran yang sangat dominan dalam kapasitas produksi air tawar global. Fakta ini ditunjukkan oleh data yang menunjukkan bahwa MSF menyumbang sekitar 64% dari total kapasitas desalinasi di seluruh dunia [27].

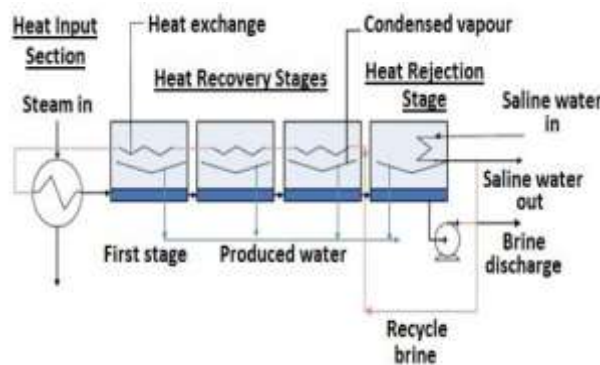
Setiap tahap sistem MSF, uap air yang terbentuk akan terkondensasi pada tabung penukar panas, menghasilkan air produk (distilat). Air garam yang tidak menguap dari tahap sebelumnya kemudian dialirkan ke tahap berikutnya. Agar proses penguapan mendadak (*flashing*) dapat terus terjadi di setiap tahap, tekanan harus dijaga lebih rendah dibandingkan tahap sebelumnya. Penurunan tekanan ini penting untuk mengimbangi penurunan suhu dan peningkatan salinitas air garam, sehingga penguapan tetap terjadi. Proses *flashing* ini diulang hingga tahap terakhir. Air garam pekat yang tersisa akhirnya didinginkan pada *Heat Rejection Stage* sebelum di keluarkan kembali. Air garam yang masuk ke sistem dimanfaatkan untuk pendinginan di tahap akhir, sehingga terjadi pertukaran panas yang efisien sebelum air umpan tersebut dipanaskan lebih lanjut di *brine heater* utama [27], [34].



Gambar 4 Konsep desalinasi unit MSF dengan Solar Parabolic Dish Collector [27].

Dalam desalinasi, panas buangan dari pembangkit listrik berbasis energi terbarukan dan konvensional dapat meningkatkan suhu air hingga 110°C. Jumlah tahap dalam sistem MSF secara langsung memengaruhi tingkat produktivitas sistem secara keseluruhan. Beberapa tahap yang terlibat dalam proses ini meliputi proses pemanasan air garam, proses umpan balik air salinitas, dan proses peningkatan suhu air garam [31]. Selain dengan konsep tersebut MSF ada yang menggunakan konsep seperti gambar 5, namun tidak jauh berbeda konsepnya hal ini mempunyai tujuan yang sama. Dengan

metode MSF yang dimanfaatkan dapat menjadi pengolahan untuk salinitas air garam.



Gambar 5 Diagram alir skema distilasi MSF [34]

Pada sistem *Multi-Stage Flash (MSF)*, air garam umpan dicampur dengan sebagian air garam daur ulang dan terlebih dahulu dipanaskan di *heat input section* hingga mencapai suhu operasi sekitar 90–110°C menggunakan uap pemanas. Mengakibatkan, larutan yang tersisa mengalami peningkatan salinitas dan titik didih. Panas dari uap disalurkan ke aliran air garam masuk, menyebabkan uap mengembun menjadi air tawar, sementara panasnya dipulihkan untuk mendukung proses penguapan berikutnya. Proses ini berulang pada setiap tahap dengan tekanan yang semakin rendah, sehingga sebagian air garam terus-menerus mengalami penguapan bertahap (*multi-stage flashing*). Melalui mekanisme ini, sistem MSF mampu memanfaatkan kembali panas secara efisien, menghasilkan air tawar dengan konsumsi energi termal yang relatif tinggi tetapi operasi yang stabil dan berkelanjutan [34].

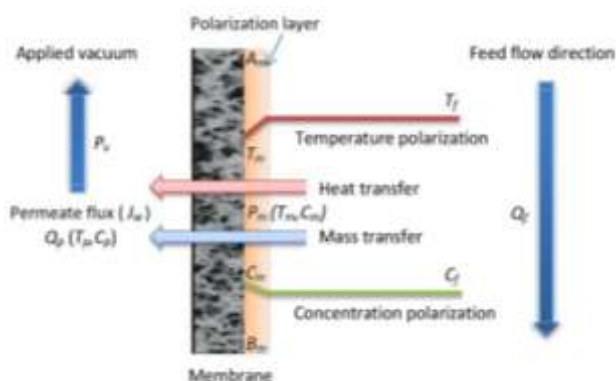
4 VACUUM MEMBRANE DISTILLATION (VMD)

Di antara beberapa teknologi desalinasi, distilasi membran (MD) memiliki keunggulan dibandingkan teknologi lainnya karena dapat menangani aliran air garam berkadar salinitas tinggi dengan menggunakan panas buang atau panas rendah. MD adalah proses pemisahan membran yang digerakkan secara termal di mana aliran umpan garam hangat bersentuhan langsung dengan membran hidrofobik. Pemisahan dicapai melalui penguapan air pada membran dan difusi uap air secara preferensial melalui pori-pori membran, yang menghasilkan penolakan teoritis 100% zat terlarut [36], [37].

Vacuum Membrane Distillation (VMD) merupakan salah satu inovasi dari teknologi *Membrane Distillation (MD)* yang menggabungkan prinsip penguapan pada tekanan rendah dengan pemisahan fase menggunakan membran hidrofobik.

Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan perbedaan tekanan uap air antara sisi air garam dan sisi kondensasi yang divakumkan. Pada proses ini, air garam dipanaskan hingga suhu 40-70°C, cukup untuk menghasilkan tekanan uap air tanpa mencapai titik didih. Uap air yang terbentuk kemudian menembus pori-pori membran hidrofobik yang hanya dapat dilewati uap, bukan cairan menuju sisi bertekanan rendah [38], [37].

Pemodelan perpindahan panas dan massa yang terperinci dalam VMD sangat penting untuk mengoptimalkan proses karena memberikan wawasan yang berkontribusi pada kemajuan dan keberhasilan implementasi desalinasi air laut menggunakan teknologi VMD, penerapan kondisi vakum pada sisi permeate memperbesar perbedaan tekanan parsial uap antara kedua sisi membran, sehingga mempercepat laju transpor uap dan meningkatkan fluks permeat secara signifikan. Dalam kondisi optimum, VMD mampu menghasilkan fluks hingga 8–11 kg/m²·h dengan kemurnian air <10 ppm, menjadikannya salah satu teknologi desalinasi bersuhu rendah paling efisien saat ini [36].



Gambar 6 Skema perpindahan panas dan massa dalam proses VMD [38]

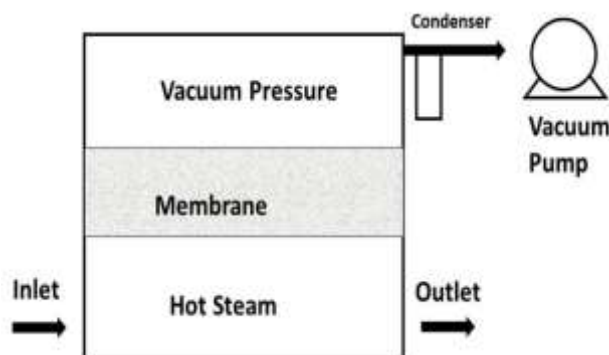
Pada gambar 6 untuk menyederhanakan model, menggunakan asumsi-asumsi berikut :

- Proses dianggap berada dalam keadaan tunak.
- Perpindahan momentum dalam domain vakum dianggap tidak signifikan.
- Perpindahan panas yang dapat diabaikan diasumsikan terjadi dalam domain permeat, serta melalui membran melalui konduksi.
- Perpindahan massa dalam permeat tidak dipertimbangkan, dan diasumsikan bahwa fraksi massa uap air sama dengan satu.
- Diasumsikan bahwa distilat tidak mengandung garam [38].

Hal ini menghasilkan konsumsi energi yang lebih rendah, kehilangan panas melalui konduksi yang lebih rendah melintasi permukaan membran, dan perpindahan panas minimal melalui konduksi karena

tekanan rendah pada sisi permeat. Pemodelan perpindahan panas dan massa yang terperinci dalam VMD sangat penting untuk mengoptimalkan proses, karena memberikan wawasan berharga yang berkontribusi untuk kemajuan dan keberhasilan implementasi desalinasi air laut menggunakan teknologi VMD [39], [40].

Adapun konsep yang berbeda pada gambar di bawah ini, walaupun mempunyai tujuan yang sama.



Gambar 7 Proses Distilasi Vakum Membran [40]

Dengan adanya vakum, lapisan batas di dekat membran pada sisi permeat lebih tipis. Ketiadaan lapisan batas ini memungkinkan VMD memiliki fluks 70 yang lebih besar daripada metode-metode yang lainnya. Hal ini berfokus pada penggunaan teknologi VMD untuk desalinasi air laut karena keunggulan lapisan batas yang lebih tipis sehingga menghasilkan fluks permeat yang lebih besar. Dibandingkan dengan metode-metode lain, teknologi ini menawarkan beberapa keunggulan tersendiri, kemudahan penggunaan dan ramah lingkungan [40].

5 KESIMPULAN

Kajian ini meninjau penerapan teknologi vakum pada beberapa metode desalinasi, yaitu *Vacuum Multi-Effect Distillation* (V-MED), sistem *Multi-Stage Flash* (MSF), dan *Vacuum Membrane Distillation* (VMD). Ketiga pendekatan tersebut menunjukkan bahwa penurunan tekanan memiliki pengaruh konsisten terhadap peningkatan laju penguapan dan penurunan kebutuhan suhu operasi, meskipun karakteristik teknis dan batasannya berbeda-beda.

Pada sistem V-MED, operasi bertingkat di bawah kondisi vakum memungkinkan pemanfaatan panas laten secara berulang, sehingga kebutuhan energi spesifik dapat ditekan dibandingkan MED konvensional. Penguapan dapat terjadi pada rentang suhu lebih rendah (sekitar 50–70°C)[33], namun performanya bergantung pada stabilitas tekanan

antartahap serta kemampuan sistem menjaga efisiensi pemulihan panas.

Untuk MSF, penerapan vakum berperan dalam mempertahankan proses flashing pada setiap tahap meskipun suhu air garam menurun. Sistem ini menunjukkan ketahanan operasi pada salinitas tinggi, tetapi konsumsi energi termal tetap relatif besar dan efektivitas vakum sangat dipengaruhi desain penukar panas serta jumlah tahap yang digunakan.

Pada VMD, penerapan tekanan rendah pada sisi permeat meningkatkan perbedaan tekanan parsial uap, sehingga menghasilkan fluks permeat lebih tinggi dibandingkan distilasi membran tanpa vakum. Teknologi ini dapat beroperasi pada suhu lebih rendah (40–70°C)[38], namun performa sangat dipengaruhi oleh karakteristik membran, pengendalian fouling, serta kebutuhan stabilitas vakum untuk menjaga kualitas permeat.

Secara keseluruhan, penerapan vakum pada ketiga teknologi menunjukkan bahwa tekanan rendah dapat menjadi parameter signifikan dalam peningkatan kinerja desalinasi. Namun, setiap metode memiliki kondisi operasi optimal dan keterbatasan tersendiri. Maka untuk pengembangan riset desalinasi berikutnya, beberapa aspek yang perlu diperdalam yaitu evaluasi konsumsi energi total pada tiap teknologi dalam berbagai kondisi tekanan, analisis perbandingan rasio pemulihan air dan kualitas distilat, daya tahan material terhadap operasi vakum jangka panjang, serta integrasi dengan sumber panas bersuhu rendah seperti energi surya.

KEPUSTAKAAN

- [1] S. F. Dina and M. Syahputra, "Pengaruh Tekanan Vakum Pada Proses Desalinasi Air Laut Menggunakan Tenaga Surya Tipe Kolektor Tabung Vakum," vol. 12, no. 24, 2017.
- [2] F. Teknik and U. Tridinanti, "PENYULINGAN AIR LAUT MENJADI AIR TAWAR," *Desiminasi Teknol.*, vol. 7, 2019.
- [3] I. Santosa, "PEMBUATAN GARAM MENGGUNAKAN KOLAM KEDAP AIR BERUKURAN SAMA," vol. 12, pp. 1–112, 2014, [Online]. Available: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/> (the "License")
- [4] A. M. Yusuf, D. Mugisidi, I. P. Aji, and O. Heriyani, "Pengaruh Vakum Pada Penguapan Air Laut," vol. 8, no. 2, 2023.
- [5] M. Sami, "Produksi Kondensat pada Sistem Desalinasi Air Asin Berbasis Energi Surya," vol. 6, no. 1, pp. 44–48, 2022.
- [6] J. A. Andrés-mañas, L. Roca, A. Ruiz-aguirre, F. G. Acién, J. D. Gil, and G. Zaragoza, "Application of solar energy to seawater desalination in a pilot system based on vacuum multi-effect membrane distillation," *Appl. Energy*, vol. 258, no. August 2019, p. 114068, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114068.
- [7] M. A. Al-obaidi, F. L. Rashid, H. A. Abdulhadi, and S. S. Al-musawi, "A Review of Vacuum-Enhanced Solar Stills for Improved Desalination Performance," pp. 1–32, 2025.
- [8] A. Tarif, K. Dong, S. Han, and H. Park, "Solar desalination: current technological status and future directions," vol. 8, 2025.
- [9] E. Ayati, Z. Rahimi-ahar, M. S. Hatamipour, and Y. Ghalavand, "Performance evaluation of a heat pump-driven vacuum humidification-dehumidification desalination system," vol. 180, no. August, 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115872.
- [10] M. Jahanpanah, S. J. Sadatinejad, A. Kasaeian, M. H. Jahangir, and H. Sarrafha, "Experimental investigation of the effects of low-temperature phase change material on single-slope solar still," *Desalination*, vol. 499, no. October 2020, p. 114799, 2021, doi: 10.1016/j.desal.2020.114799.
- [11] B. B. Taqwa and H. Ramza, "Perancangan Alat Proses Distilasi Air Laut menggunakan Pemanas Elektrik," vol. 5, no. 2502, pp. 204–214, 2020, doi: 10.22236/teknoka.v5i.327.
- [12] W. Kabupaten, D. Nur, U. Agustina, S. Sudarti, and Y. Yushardi, "Jurnal Phi Analisis Potensi Pengembangan Teknologi Desalinasi Air Laut Sebagai Penyedia Air Bersih," vol. 6, no. 2, pp. 7–14, 2021.
- [13] A. M. Lubis, "Desalinasi Air Payau Dengan Teknik Evaporasi Surya dan Biomassa," vol. 3, no. 1, pp. 117–120, 2019.
- [14] Y. Oscar, H. Kiswanto, P. Maritim, and N. Indonesia, "Pengaruh Perubahan Vakum dan Temperatur Pemanas Fresh Water Generator terhadap Produksi Air Tawar di MT . PM REGENT," vol. 8, no. 2, pp. 97–103, 2024.
- [15] H. H. Tanusekar and A. T. Sutanahaji, "Rancang Bangun dan Uji Kinerja Alat Desalinasi Sistem Penyulingan menggunakan Panas Matahari dengan Pengaturan Tekanan Udara Design Build and Test Performance Tools Distillation Desalination System using Solar Heat with Air Pressure Settings," vol. 2, no. 1, pp. 1–8, 2014.

- [16] N. Hamawand, Ihsan; Lewis, Larry; Ghaffour and Jochen, "Desalination of salty water using vacuum spray dryer driven by solar energy," 2017, doi: 10.1016/j.desal.2016.11.015.
- [17] H. V Sihombing, H. Ambarita, and H. S. Siagian, "Simulasi Laju Penguapan Air Laut Secara Natural Menggunakan ANSYS Fluent," vol. 6, no. 1, pp. 1–9, 2024.
- [18] A. Energi, P. Alat, D. Air, L. Tenaga, and S. M. Lereng, "SURYA MODEL LERENG," no. April, pp. 193–201, 2021.
- [19] H. Ambarita, "Kajian Numerik Penguapan Pada Evaporator Desalinasi Air Laut Sistem Vakum Alami," vol. 1, no. 1, 2018.
- [20] A. Gkountas, P. Bakalis, E. Ntavou, A. Skiadopoulou, and D. Manolakos, "applied sciences Modelling and Parametric Analysis of a Brine Treatment Unit Using a High-Temperature Heat Pump and a Vacuum Evaporator," 2022.
- [21] A. Azizah and N. Nova, "Pola Kristalisasi Garam Dalam Kondisi Lingkungan Ekstrem," vol. 1, no. 3, pp. 76–81, 2025.
- [22] S. Haji, A. Tunggul, S. Haji, R. Wirosoedarmo, and M. W. Tyas, "Analisis Nomografi Suhu , Laju Penguapan dan Tekanan Udara untuk Perancangan Alat Desalinasi Tenaga Surya Dengan Pengaturan Vakum Analysis of Temperature Nomography , Evaporation Rate and Air Pressure for Solar-Driven Desalination System Design With Vacuu," no. March, pp. 1–7, 2020.
- [23] M. W. Tyas, A. T. Sutan, and H. Ruslan, "A nalisis Nomografi Suhu , Laju Penguapan Dan Tekanan Udara Pada Alat Desalinasi Tenaga Surya Dengan Pengaturan Vakum The Nomographic Analysis Against Temperature , Evaporation Rate and Air Pressure For A Solar Powered Desalination Device with Vacuum Control," pp. 55–61.
- [24] Z. P. Gong and Y. X. Zhou, "Study on exergy efficiency of active desalination coupled solar collector", doi: 10.1088/1757-899X/725/1/012008.
- [25] J. I. I. Teknik, "Jurnal Energy Uji Eksperimen Destilasi Air Laut dengan," vol. 9, no. 2, pp. 74–80, 2019.
- [26] D. U. Lawal, M. A. Antar, K. G. Ismaila, A. Khalifa, and S. M. Alawad, "Hybrid multi-stage flash (MSF) and membrane distillation (MD) desalination system for energy saving and brine minimization," vol. 548, no. October 2022, 2023.
- [27] A. Babaebazaz and S. Gorjian, "Integration of a Solar Parabolic Dish Collector with a Small-Scale Multi-Stage Flash Desalination Unit : Experimental Evaluation , Exergy and Economic Analyses," 2021.
- [28] A. Amrane, N. Moula, J. Zhang, and L. Mouni, "Analysis of Desalination Performance with a Thermal Vapor Compression System," 2023.
- [29] D. Systems, "Assessing the Impact of Operating Conditions on the Energy and Exergy Efficiency for Multi-Effect Vacuum Membrane," 2021.
- [30] Q. Chen *et al.*, "A zero liquid discharge system integrating multi-effect distillation and evaporative crystallization for desalination brine treatment," *Desalination*, vol. 502, p. 114928, 2021, doi: 10.1016/j.desal.2020.114928.
- [31] M. Zohri, "Mathematical Modelling of Engineering Problems Mathematical Modelling and Performance Review of Desalination Technology Based Renewable Energy," vol. 11, no. 6, pp. 1491–1504, 2024.
- [32] G. Cao *et al.*, "Seawater Desalination Based on a Bubbling and Vacuum-Enhanced Direct Contact Membrane Distillation," vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/3587057.
- [33] T. E. Storage, "Pengembangan Alat Desalinasi Air Laut dengan Teknologi Thermal Energy Storage Development of Seawater Desalination Equipment with Technology," vol. 5, pp. 171–178, 2023.
- [34] A. J. Toth, "Modelling and Optimisation of Multi-Stage Flash Distillation and Reverse Osmosis for Desalination of Saline Process Wastewater Sources," pp. 1–18, 2020.
- [35] G. Guo, H. Deng, C. Zhu, and Z. Ji, "Spatially dependent salinity effect in actively vacuumed spray flash desalination," *Desalination*, vol. 537, no. May, p. 115868, 2022, doi: 10.1016/j.desal.2022.115868.
- [36] B. Lin, Y. Yu, C. Chen, and M. Malmali, "Comparative Energetics of Various Membrane Distillation Configurations and Guidelines for Design and Operation," 2023.
- [37] Y. Liu *et al.*, "Desalinating a real hyper-saline pre-treated produced water via direct-heat vacuum membrane distillation," *Water Res.*, vol. 218, no. 310, 2022, doi: 10.1016/j.watres.2022.118503.
- [38] Z. Triki *et al.*, "Numerical Modelling and Performance Evaluation of Vacuum Membrane Distillation for Energy-Efficient Seawater Desalination: Towards Energy-

- Efficient Solutions,” 2023.
- [39] C. Y. H. Dong¹ and L. Zhang, “Slug Flow-enhanced Vacuum Membrane Distillation for Seawater Desalination: Flux Improvement and Anti-fouling Effect”.
- [40] H. Idrees *et al.*, “Techno-Economic Analysis of Vacuum Membrane Distillation for Seawater Desalination,” 2023.