

Evaluasi Kondensor Berpendingin Udara dan Air pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap

FEBRI ANDRIYUDA¹, DANI RUSIRAWAN²

¹Mahasiswa Magister Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

²Prodi Magister Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

Email: febriandriyuda@gmail.com

Received 28 Desember 2023 | *Revised* 17 Januari 2024 | *Accepted* 22 Januari 2024

ABSTRAK

Artikel ini membahas sebuah skema gabungan untuk meningkatkan efisiensi kondensor pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap dengan menggunakan sistem refrigerasi kompresi uap. Dalam skema ini, zat pendingin cair yang keluar dari katup *throttle* sistem pendingin disirkulasikan melalui pipa dan tabung kondensor. Sebaliknya, uap yang keluar dari turbin pembangkit dialirkan ke luar tabung. Proses ini menyebabkan zat pendingin mengalami penguapan dan kondensasi, mencapai koefisien perpindahan panas tertinggi antara uap dan refrigeran, dan mengoptimalkan kinerja kondensor. Keunggulan utama skema ini terletak pada kemampuannya untuk mengatur temperatur kondensor sesuai dengan kondisi lingkungan. Analisis termodinamika mendalam melibatkan pembangkit listrik tenaga uap, sistem pendingin kompresi uap, dan skema gabungan ini memberikan pemahaman yang mendalam mengenai interaksi kompleks antara berbagai komponen tersebut. Selain itu, dampak kondisi sekitar terhadap pengoperasian *Air Cooled Condenser* (ACC) juga diperiksa. Lebih lanjut, penelitian melibatkan dua teknologi sistem pendingin hybrid basah/kering untuk meningkatkan kinerja pada temperatur sekitar yang tinggi. Artikel ini menunjukkan bahwa skema gabungan ini secara signifikan meningkatkan efisiensi kondensor dan mengurangi dampak lingkungan pada pembangkit listrik, artikel ini juga memberikan landasan penting untuk pengembangan teknologi yang lebih berkelanjutan dan efisien dalam konteks kondensor PLTU, dan artikel ini membuka peluang untuk peningkatan kinerja sistem pendingin dengan mempertimbangkan faktor lingkungan dan kondisi operasional yang beragam. Implikasi dari penelitian ini dapat diaplikasikan dalam industri pembangkit listrik dan bidang terkait untuk meningkatkan efisiensi energi dan keberlanjutan.

Kata Kunci: ACC, Efisiensi Kondensor, Koefisien Perpindahan Panas, Pendingin Hybrid, Temperatur, Uap

ABSTRACT

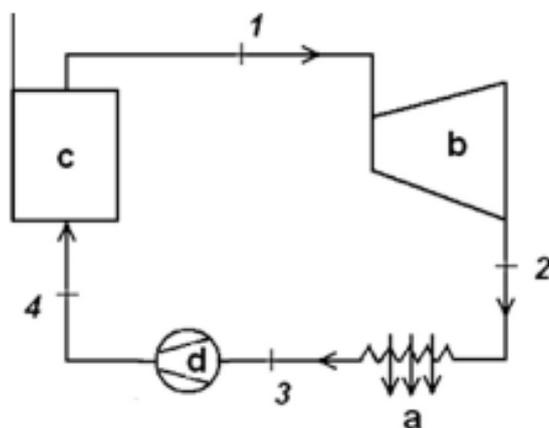
This article proposes an integrated scheme to improve the efficiency of condensers in Steam Power Plants (SPP) by utilizing a vapor compression refrigeration system. In this scheme, the liquid refrigerant exiting the throttle valve of the cooling system is circulated through pipes and condenser tubes. Conversely, the steam exiting the power generator's turbine is directed outside the tubes. This process induces the evaporation and condensation of the refrigerant, achieving the highest heat transfer coefficient between steam and refrigerant, thus optimizing the condenser's performance. The main advantage of this scheme lies in its ability to regulate the condenser temperature according to environmental conditions. In-depth thermodynamic analysis involving the steam power plant, vapor compression refrigeration system, and this combined scheme provides a comprehensive understanding of the intricate interactions among various components. Additionally, the impact of ambient conditions on the operation of the Air Cooled Condenser (ACC) is also examined. Furthermore, the study explores two hybrid wet/dry cooling system technologies to enhance performance in high ambient temperatures. The results indicate that this combined scheme significantly improves condenser efficiency and reduces environmental impacts in power plants. The article lays a crucial foundation for the development of more sustainable and efficient technologies in the context of SPP condensers. Moreover, it opens opportunities for enhancing cooling system performance by considering diverse environmental factors and operational conditions. The implications of this research can be applied in the power generation industry and related fields to enhance energy efficiency and sustainability.

Keywords: ACC, Condenser Efficiency, Heat Transfer Coefficient, Hybrid Cooling, Temperature, Vapor

1. PENDAHULUAN

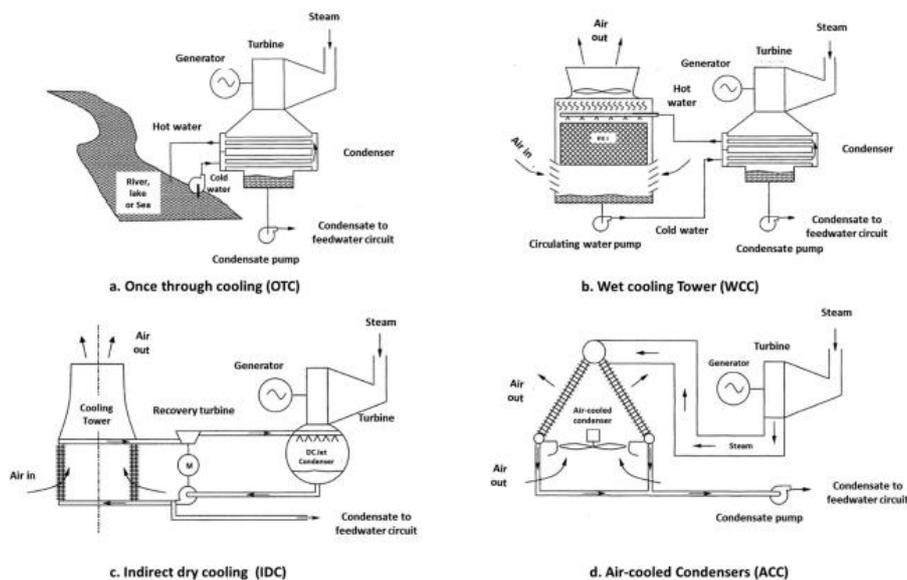
PLTU adalah jenis pembangkit listrik tenaga termal yang banyak digunakan karena efisiensinya baik dan bahan bakarnya mudah didapat sehingga menghasilkan energi listrik yang ekonomis (**Gap et al., 2020**). Hukum pertama termodinamika menyatakan bahwa energi kekal dan diubah dalam bentuk yang berbeda-beda, dan hukum kedua memungkinkan untuk mengevaluasi kerugian termodinamika (pembangkitan entropi), dan seberapa jauh energi sebenarnya termodinamika (**Porto-Hernandez et al., 2023**). Pembangkit listrik tenaga uap menyediakan sebagian besar listrik dunia, pada pembangkit ini air dipanaskan dalam pembangkit uap atau ketel uap menjadi uap yang digunakan untuk menggerakkan generator turbin, uap yang dikeluarkan dari turbin harus dikondensasikan dan dikirim kembali ke pembangkit uap/boiler. Kondensasi uap terjadi di kondensor uap, laju aliran massa air pendingin yang lebih besar dari 25 kali laju aliran massa uap diperlukan tergantung pada kenaikan temperatur yang diijinkan dari air pendingin, biasanya 8–14°C. Pada dasarnya ada dua jenis desain sistem air pendingin yaitu sistem pendingin air sekali lewat (loop terbuka) atau sirkulasi ulang (loop tertutup). Pabrik yang dilengkapi dengan sistem air pendingin sekali pakai mempunyai penggunaan air yang relatif tinggi yaitu berkisar 3 m³/mnt untuk setiap MW, dan hal ini menyebabkan pengaruh kerugian yang kritis terhadap ekosistem perairan (**Hegazy et al., 2016**).

Pada Gambar 1 menunjukkan susunan skema komponen-komponen sederhana yang terdiri dari kondensor (a), turbin (b), boiler (c), dan pompa air umpan (d). Uap bertekanan tinggi diproduksi di boiler (c) dan mengalir ke turbin (b), di mana ia berekspansi ke tekanan rendah (sering kali vakum) dan menghasilkan tenaga mekanik, yang diubah menjadi tenaga listrik oleh generator.



Gambar 1. Skema PLTU Dengan Kondensor Pendingin Udara (Hegazy et al., 2016)

Limbah panas dari siklus Rankine di pembangkit listrik tenaga uap biasanya diekstraksi oleh kondensor permukaan. Teknologi pendinginan yang berbeda digunakan untuk membuang panas ke atmosfer setelah diekstraksi oleh kondensor.



Gambar 2. Teknologi Pendinginan Kondensor Utama Pembangkit Listrik Tenaga Uap (Akpan & Fuls, 2019)

Ada empat pilihan teknologi pendinginan utama yang dapat digunakan pada pembangkit listrik tenaga uap. Keempat teknologi pendinginan ditampilkan pada Gambar 2 yaitu Pendinginan (OTC) sistem ini menggunakan fluida pendingin dari aliran sungai, danau atau laut yang dialirkan langsung melalui kondensor, cairan ini biasanya dikembalikan ke sumbernya, pendinginan (WCC) menggunakan air dalam siklus semi tertutup, fluida yang bersirkulasi ini didinginkan di menara pendingin melalui kombinasi perpindahan panas evaporasi dan konveksi, sistem WCC dapat berbentuk menara pendingin mekanis atau alami, pendinginan (ACC) sering disebut sebagai sistem pendingin kering karena ekstraksi panas dari uap yang mengembun biasanya dilakukan dengan melewati udara atmosfer melalui kondensor (**Davies et al., 2018**), aliran udara di atas kondensor dapat dihasilkan dengan menggunakan aliran udara paksa atau kipas angin induksi, atau terkadang menggunakan aliran udara alami, keunggulan utama kondensor berpendingin udara adalah tidak memerlukan konsumsi air, salah satu kelemahan utama kondensor jenis ini adalah konsumsi daya yang besar dan sangat sensitif terhadap atmosfer siang/malam serta perubahan musim., pendinginan (IDC) sistem ini bisa menggunakan langsung kondensor semprotan kontak seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2c atau kondensor permukaan konvensional.

Kinerja kondensor mempunyai pengaruh langsung terhadap kinerja pembangkit secara keseluruhan dalam hal keluaran daya serta efisiensi termal. Umumnya, semakin rendah tekanan kondensor, semakin baik kinerjanya, ketika pembangkit listrik mengalami perubahan beban karena alasan operasional, kinerja kondensor juga mungkin terpengaruh (**Bustamante et al., 2016**).

Faktor-faktor yang mempengaruhi tekanan kondensasi pembangkit listrik tenaga uap Hal ini dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor :

- Perubahan temperatur masuk cairan pendingin
- Perubahan aliran massa fluida pendingin
- Perubahan panas yang dibuang ke kondensor
- Faktor kebersihan kondensor
- Masuknya udara ke dalam sistem
- Kondisi angin yang berlaku untuk sistem ACC (**He et al., 2013**).

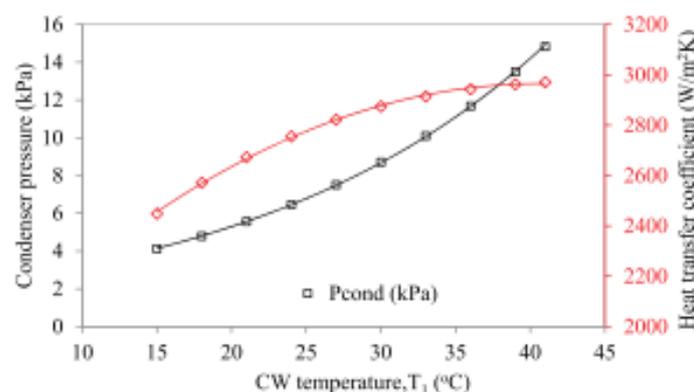
Perubahan ini dapat disebabkan oleh beberapa alasan, dimana (a) dan (b) di atas secara khusus terkait dengan jenis sistem pendingin yang digunakan untuk mengekstraksi panas dari kondensor, dan kondisi lingkungan di mana sistem ini beroperasi, sedangkan (c) terkait dengan tingkat pembangkitan pembangkit listrik. Faktor kebersihan dan masuknya udara terkait erat dengan praktik pengoperasian dan pemeliharaan peralatan di masing-masing lokasi pabrik. Pada operasi sebagian/beban rendah, perubahan paling signifikan pada tekanan kondensor dapat disebabkan oleh berkurangnya jumlah panas yang dibuang ke kondensor. Dengan semua parameter lainnya konstan, penukar panas akan selalu bekerja lebih baik ketika diminta beroperasi pada beban yang lebih rendah, besarnya peningkatan kinerja bergantung pada fungsi sistem pendingin dan arsitekturnya **(Akpan & Fuls, 2019)**.

(Laskowski, 2016) mengusulkan metode untuk menentukan kinerja kondensor pembangkit listrik tenaga uap pada kondisi di luar desain. Penulis mengajukan dua persamaan berbeda untuk menentukan temperatur keluar air pendingin berdasarkan parameter masuk dan referensi seperti temperatur masuk air pendingin, laju aliran massa air pendingin, dan temperatur uap. Namun, penelitiannya hanya mempertimbangkan satu kondensor berpendingin basah. Oleh karena itu, hasil model mungkin bergantung pada studi kasus tertentu. Selain itu, ia tidak memprediksi respons tekanan, ia hanya menentukan temperatur keluar cairan pendingin.

2. KAJIAN LITERATUR

2.1 Pendinginan Kondensor dengan Menggunakan Air

Kondensor uap merupakan salah satu komponen penting dalam pembangkit listrik yang secara signifikan mempengaruhi pembangkitan listrik dan kinerja unit dalam hal laju panas. Penurunan kinerja termal kondensor tidak hanya mempengaruhi pembangkit listrik tetapi juga kinerja termal unit secara keseluruhan. Parameter yang menentukan kinerja termal kondensor adalah laju aliran massa *cooling water* (CW), temperatur, luas perpindahan panas, kecepatan, pengotoran tabung, kotak air terisi sebagian, dan kebocoran udara. Laju aliran CW dan tekanan kondensor berubah sesuai dengan variasi beban satuan. Temperatur CW pada saluran masuk kondensor bervariasi sesuai dengan perubahan siklus temperatur tahunan sistem saluran masuk. Selama kondisi pengoperasian, kinerja kondensor dapat berubah seiring dengan variasi uap buang dan parameter CW, kondisi pengoperasian kondensor permukaan uap mempunyai pengaruh besar terhadap pembangkit listrik dan laju panas siklus turbin, pada saat yang sama, kondisi pengoperasian sistem CW menentukan kondisi pengoperasian kondensor **(Pattanayak et al., 2019)**.

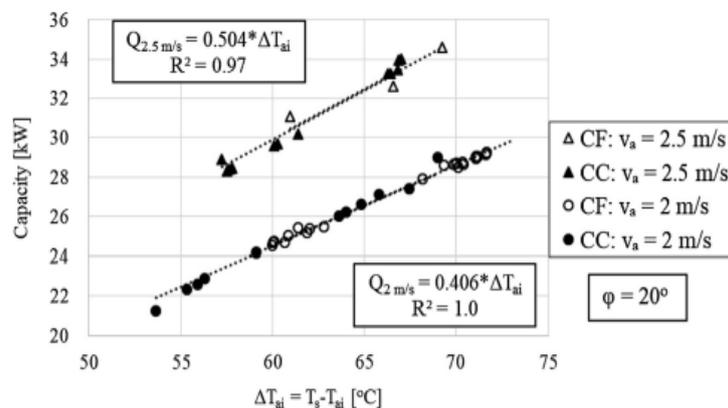


Gambar 3. Pengaruh Temperatur *Cooling Tower* Terhadap Tekanan Kondensor (Pattanayak et al., 2019)

Gambar 3 menggambarkan pengaruh temperatur CW terhadap tekanan kondensor dan koefisien perpindahan panas, dengan kenaikan temperatur CW, aliran panas berkurang, menyebabkan peningkatan tekanan kondensor untuk laju aliran CW tertentu. Koefisien perpindahan panas meningkat dengan meningkatnya temperatur CW dari 15 °C menjadi 40 °C. Seperti yang telah diamati, hubungan fungsional temperatur masuk CW dengan koefisien perpindahan panas bersifat nonlinier namun bersifat kuadratik, sedangkan pada tekanan kondensor hubungannya bersifat eksponensial.

2.2 Perpindahan Panas yang Terjadi pada Kondesor Berpendingin Air

Kapasitas dan koefisien perpindahan panas kondensor ditunjukkan pada Gambar 4 yang membandingkan kapasitas pada bagian pengujian berpendingin udara antara aliran *counter-flow* dan *co-current* pada dua kecepatan udara yang berbeda dan temperatur udara masuk yang berbeda, kapasitas meningkat secara linier seiring dengan meningkatnya perbedaan temperatur antara udara masuk dan uap untuk kedua konfigurasi aliran.



Gambar 4. Kapasitas Untuk Kondesor *Co-Current* (CC) dan *Counter-Flow* (CF) Mengikuti Tren Peningkatan Linier Vs ΔT_{ai} (Davies & Hrnjak, 2020)

Hasilnya menunjukkan bahwa untuk tabung dengan kemiringan 20°C, kapasitas tabung aliran balik sama dengan kapasitas tabung arus searah. Selain itu, peningkatan kapasitas dalam proporsi yang sama (25%) seiring dengan peningkatan kecepatan udara untuk dua kecepatan udara yang diuji (Davies & Hrnjak, 2020).

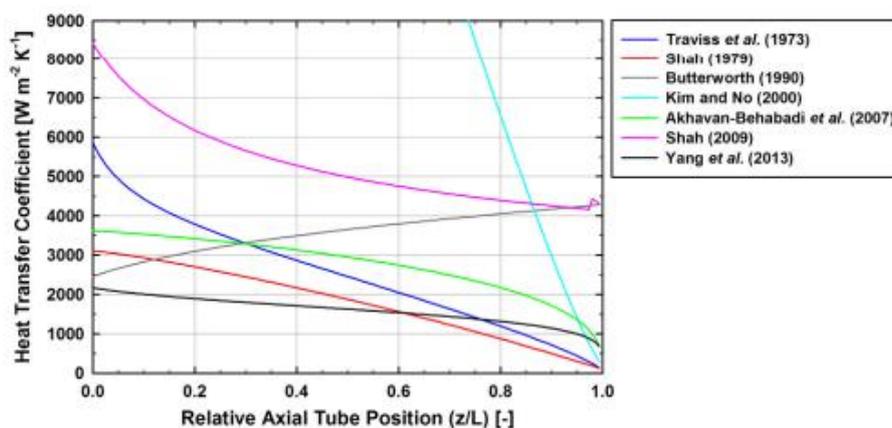
2.3 Metode Pendinginan Kondensor dengan Menggunakan Udara

Kinerja *Air-Cooled Steam Condensers* (ACSC) selalu dipengaruhi oleh pengaruh kondisi angin yang tidak menguntungkan. Penting untuk memahami mekanisme pengaruh tersebut untuk meningkatkan dan mengoptimalkan kinerja kondensor (He et al., 2013). Salah satu metode untuk mengurangi konsumsi air pada menara pendingin untuk kondensasi uap adalah dengan menggunakan teknologi berpendingin kering dengan udara sebagai media penolakan panas. Sistem berpendingin udara ini bermanfaat ketika air tidak tersedia atau tidak ekonomis, namun biasanya menghasilkan efisiensi pembangkit listrik yang lebih rendah. Penelitian ini menyelidiki penerapan kondensor berpendingin udara (ACC) dengan berbagai penyempurnaan sisi udara untuk meningkatkan kinerja pembangkit berpendingin kering ke tingkat yang mendekati pembangkit berpendingin basah (Lin et al., 2020). Saat ini, kondensor uap berpendingin udara (ACSC) banyak digunakan dalam banyak aplikasi teknologi, ACSC juga digunakan dalam sektor pembangkit listrik, karena merupakan salah satu pengganti terbaik untuk kondensor uap berpendingin air dimana kondensor uap berpendingin air tidak dapat digunakan karena kelangkaan pasokan air atau dampak lingkungan yang sangat tinggi, yang akan berdampak buruk pada lingkungan. mengakibatkan panas berlebih pada permukaan air yang digunakan

sebagai penyerap panas (**Pieve & Salvadori, 2011**). Selain pengaruh angin sekitar terhadap kinerja ACSC, metode optimasi yang relevan juga menjadi fokus penelitian. (**Bustamante et al., 2016**) mengembangkan ACSC baru untuk mengatasi hambatan termodinamika dari udara sekitar dan meningkatkan laju aliran massa udara. Setelah perhitungan rinci, ditemukan bahwa ACSC baru mencapai tingkat efisiensi pembangkit listrik berpendingin air pada umumnya, dengan peningkatan besaran sebesar 68% untuk laju aliran udara dan besaran pengurangan sebesar 66% untuk ketahanan termal sisi udara. Berdasarkan dampak yang diperoleh dari kondisi sekitar terhadap kinerja ACSC, dua teknologi sistem pendingin hibrid disarankan untuk memperbaiki kinerja yang relevan pada kasus dengan suhu tinggi. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini memberikan beberapa referensi untuk perancangan dan optimalisasi ACSC pada pembangkit listrik terkait. Ide baru untuk memperbaiki karakteristik sistem berpendingin udara, pertama kali disarankan dengan konfigurasi vertikal ACPP, dengan skala 2×600 MW (**He et al., 2019**).

2.4 Perpindahan Panas yang Terjadi pada Kondensor Berpendingin Udara

Koefisien perpindahan panas yang diprediksi dengan beberapa korelasi disajikan pada Gambar 5. Gambar tersebut menunjukkan penyebaran yang luas dalam prediksi nilai koefisien perpindahan panas seiring dengan kondensasi fluida. Di segmen tengah tabung kondensor, sesuai dengan kualitas sekitar 0,43, koefisien perpindahan panas berkisar antara $1680 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$ hingga $21.300 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Koefisien perpindahan panas rata-rata di kondensor juga mencakup rentang yang luas: $1660\text{--}24,750 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$.

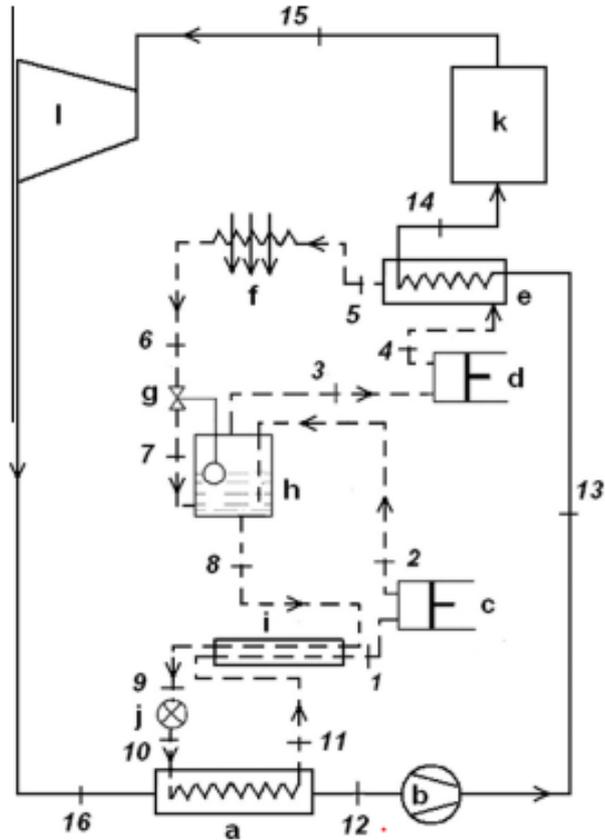


Gambar 5. Koefisien Perpindahan Panas Sisi Uap Diprediksi Dengan Korelasi Yang Berbeda Sepanjang Penukar Panas (Mahvi et al., 2018)

Sejumlah metode peningkatan perpindahan panas kondensasi yang menjanjikan telah dibahas. Studi peningkatan kondensasi sebelumnya umumnya berfokus pada fluida kerja dan kondisi pengoperasian yang mungkin tidak berlaku untuk ACC pembangkit listrik. Untuk menerapkan peningkatan pada ACC, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengukur manfaat perpindahan panas dan penurunan tekanan dalam tabung berdiameter besar untuk kondensasi uap pada fluks massa rendah. Properti ini harus dipertimbangkan secara hati-hati berdasarkan pertimbangan ekonomi untuk menilai kelayakannya untuk ACC. Meskipun terdapat banyak penelitian mengenai penurunan tekanan kondensasi dan perpindahan panas, penelitian ini telah mengamati kekurangan dalam literatur untuk aplikasi kondensor berpendingin udara. Untuk mendekati kinerja kondensor berpendingin basah tanpa konsumsi air, penelitian lebih lanjut harus dilakukan pada kondensasi uap dalam geometri ACC saat ini dan dalam konfigurasi yang ditingkatkan.

2.5 Metode Pendinginan Gabungan Kondensator dengan Menggunakan Air dan Udara

Pada metode ini akan dilakukan proses penggabungan dengan menggunakan dua pendinginan atau hybrid antara pendingin udara dan pendingin air. Pada Gambar 6 ditunjukkan bahwa sistem ini terdiri dari dua siklus, yaitu *uap power plant cycle* (SPPC) dan *vapor compression refrigeration system* (VCRC).



Gambar 6. Skema Pendingin Gabungan Pada Kondensator (Hegazy et al., 2016)

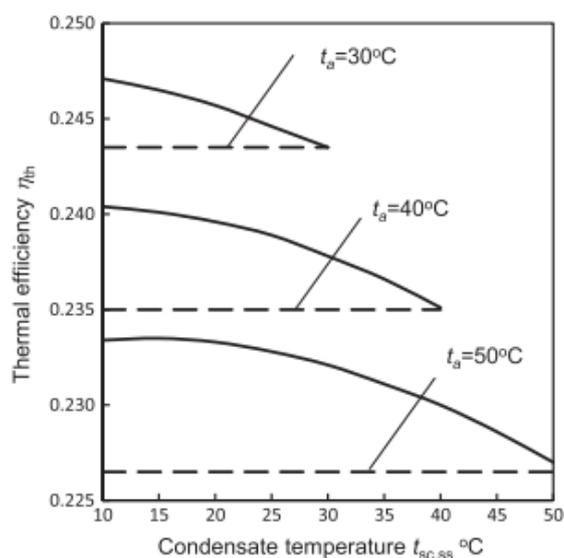
Siklus uap dapat terdiri dari komponen-komponen yang membentuk pembangkit listrik tenaga uap modern. Skema pendingin gabungan terdiri dari beberapa komponen yaitu ketel (k), turbin uap (I), kondensator uap (a) dan pompa air umpan (b). Siklus pendinginan terdiri dari sistem kompresi dua tahap (c) dan (d) (ini juga masing-masing ditandai dengan I dan II), dua kondensator pendingin (e) dan (f), dua katup pelambatan (g) dan (j), tangki flash (h) untuk intercooling dan pembuangan gas flash, *Liquid Line / Suction Line – Heat Exchanger* (LLSL-HE) (i) dan evaporator (a) yang bekerja secara bersamaan sebagai kondensator pembangkit listrik tenaga uap. Dalam siklus ini, uap refrigeran bertekanan rendah yang berasal dari LLSL-HE (i) dikompresi oleh kompresor (c) hingga tekanan menengah, dan dimasukkan ke dalam ruang flash (h). Fase cair dan uap dipisahkan setelah pemuaiian tahap pertama melalui katup throttle (g), dan dicampur dengan uap terkompresi yang berasal dari tahap kompresor pertama (c), uap diumpungkan ke kompresor tahap kedua (d) di mana uap tersebut dikompresi hingga mencapai tekanan tinggi dari kondensator zat pendingin, dan cairan mengalami pemuaiian lebih lanjut dalam perjalanannya ke evaporator (a) melalui pemuaiian katup (j). LLSL-HX (i) berfungsi untuk mendinginkan refrigeran bertekanan tinggi yang berasal dari ruang flash (h) dengan uap hisap bertekanan rendah, yang menjadi super panas dalam proses ini. Panas yang diserap dari uap yang mengembun dan panas kompresi dihilangkan oleh dua kondensator zat pendingin (e) dan (f), di mana zat pendingin uap bertekanan tinggi dikondensasikan. Cairan refrigeran yang terkondensasi dipindahkan ke katup ekspansi

refrigeran (g). Refrigeran cair bertekanan rendah mengalir melalui tabung evaporator / kondensor (a), menyerap panas, berubah menjadi uap, yang selanjutnya mengembungkan uap. Kondensat air dan refrigeran uap bertekanan rendah yang meninggalkan evaporator / kondensor (a) masing-masing melengkapi siklus uap dan pendinginan.

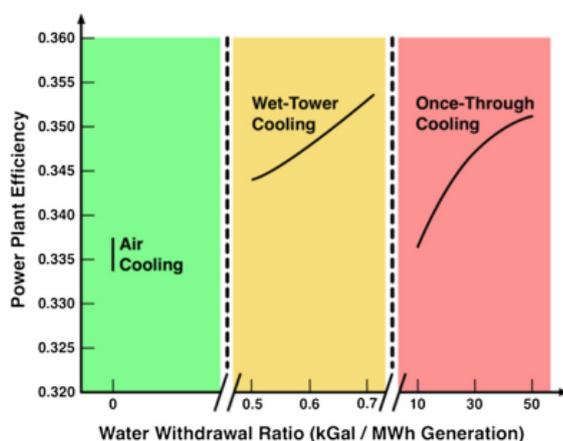
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengaruh Efisiensi

Pada Gambar 7 efisiensi termal gabungan pembangkit uap dan sistem pendingin selalu lebih tinggi dibandingkan dengan pendinginan kondensor pembangkit uap dengan udara sekitar. Perbedaan antara efisiensi termal dari kedua kasus meningkat dengan temperatur lingkungan dan temperatur kondensor uap diturunkan. Perbedaan ini bervariasi antara 12 dan 1,2% dari kisaran temperatur lingkungan 50–30°C dan temperatur kondensor uap 50–15°C.



Gambar 7. Efisiensi Termal Gabungan Pembangkit Uap Aktual Dan Siklus Pendinginan (Hegazy et al., 2016)

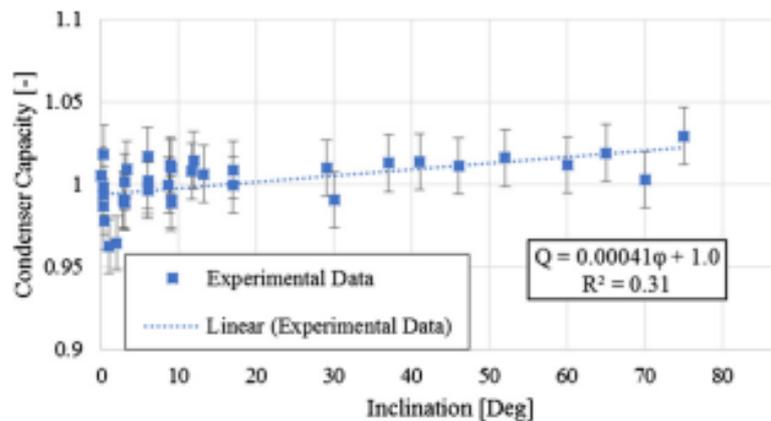


Gambar 8. Pengaruh Efisiensi Dengan Sistem Pendingin Udara Dan Air (Bustamante et al., 2016)

Pada Gambar 8 kondisi pengoperasian dasar, dengan temperatur udara sekitar 30°C, sistem pendingin basah menghasilkan ~6% lebih banyak daya dibandingkan sistem pendingin kering, hal ini terutama disebabkan oleh perbedaan temperatur awal yang tinggi yang dibutuhkan oleh sistem pendingin kering (~35°C), yang meningkatkan tekanan balik turbin uap. ITD tinggi ini diperlukan untuk menyediakan temperatur yang cukup pada perbedaan perpindahan panas mengingat resistensi termal sisi udara yang tinggi, dan untuk memberikan kenaikan temperatur yang diperlukan dalam aliran udara, menurunkan ITD memerlukan kedua faktor ini untuk diatasi **(Bustamante et al., 2016)**.

3.2 Pengaruh kemiringan pada kondensor

Variasi kemiringan menyumbang 31% variasi kapasitas. Ini adalah pengaruh yang signifikan, saat kemiringan meningkat, kondensor kapasitas meningkat 0,041% untuk setiap derajat perubahan kemiringan horizontal, dengan perkiraan peningkatan sebesar 3,1% pada kemiringan maksimum yang diuji 75°. **(Kang dkk)** sebelumnya telah menunjukkan bahwa peningkatan sudut kemiringan ke bawah menyebabkan fraksi rongga meningkat. Peningkatan fraksi rongga ini menyebabkan lebih banyak dinding kondensor tersedia untuk perpindahan panas kondensasi, sehingga meningkatkan kapasitas kondensor.

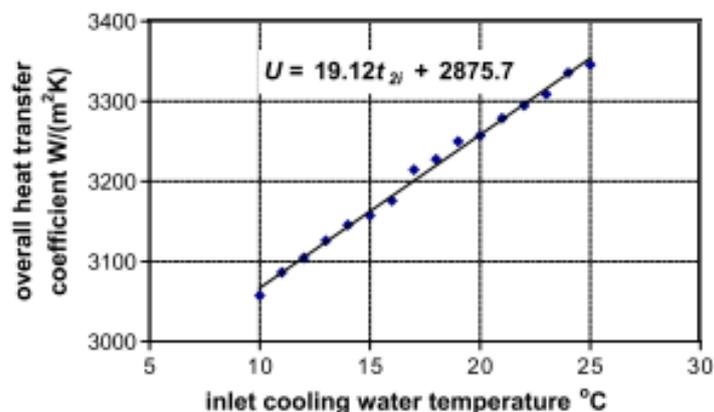


Gambar 9. Pengaruh Kemiringan Terhadap Kapasitas Kondensor (Davies et al., 2019)

Gambar 9 menunjukkan peningkatan kapasitas kondensor untuk tabung miring ke bawah dibandingkan konfigurasi horizontal. Peningkatan ini terutama disebabkan oleh perbaikan drainase kondensat dengan sudut kemiringan yang lebih tinggi. Pada kemiringan maksimum yang diuji sebesar 75°, dalam setengah tabung eksperimental, kapasitas meningkat 3,1% dibandingkan dengan kemiringan maksimum yang diuji horizontal dan kemiringan 0,6% versus 60°. Peningkatan ini diharapkan meningkat menjadi sekitar 4,5% untuk tabung penuh **(Davies et al., 2019)**.

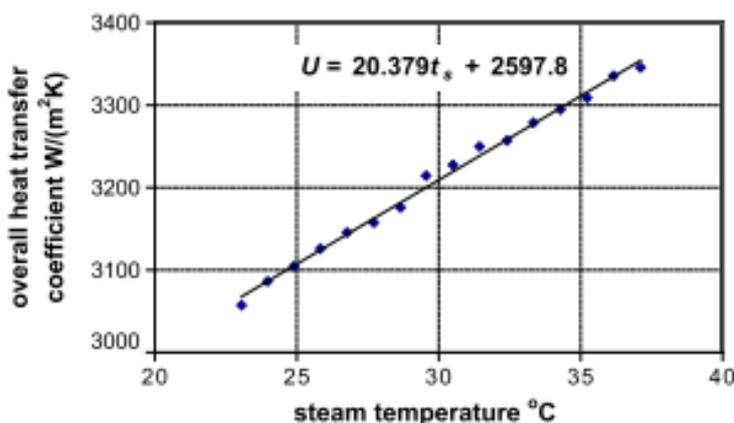
3.3 Pengaruh Temperatur Air Pada Saluran Masuk Kondensor Uap Terhadap Koefisien Perpindahan Panas

Pada Gambar 10 menunjukkan pengaruh temperatur air pendingin pada saluran masuk kondensor terhadap koefisien perpindahan panas keseluruhan. Seperti dilihat pada gambar



Gambar 10. Pengaruh Temperatur Air Pendingin Terhadap Koefisien Perpindahan Panas (Laskowski, 2016)

hubungan antara koefisien perpindahan panas keseluruhan dan temperatur air pendingin pada saluran masuk kondensator kira-kira linier. Kemiringan garis lurus masuk sama dengan turunan koefisien perpindahan panas keseluruhan terhadap temperatur air pendingin pada saluran masuk kondensator, yaitu $19,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^2)$.



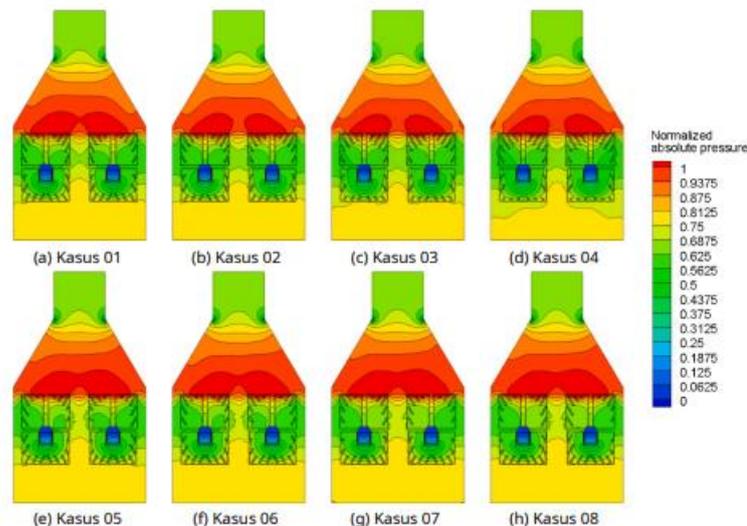
Gambar 11. Hubungan Antara Koefisien Perpindahan Panas Keseluruhan Dan Temperatur Uap (Laskowski, 2016)

Hubungan antara koefisien perpindahan panas keseluruhan dan temperatur uap kira-kira linier. Kemiringan garis lurus masuk dapat dilihat pada Gambar 11 sama dengan turunan koefisien perpindahan panas keseluruhan terhadap temperatur uap, yaitu $20,379 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^2)$.

3.4 Pengaruh Jumlah Tabung

Gambar 12 menunjukkan distribusi tekanan absolut yang dinormalisasi untuk jumlah tabung yang berbeda di sisi atas. Ketika tabung-tabung tersebut dihilangkan pada sisi atas, tabung-tabung tersebut ditambahkan pada sisi bawah. Akibatnya, jumlah totalnya selalu sama, berapapun jumlah tabung di sisi atas. Tekanan absolut pada model dasar menunjukkan bahwa gradien tekanan yang lebih besar diperkirakan terjadi di depan uap dan memasuki bundel tabung. Semakin banyak tabung yang dihilangkan di sisi atas, hambatan aliran berkurang di daerah bertekanan tinggi, dan uap dengan mudah mengalir ke dalam bundel tabung.

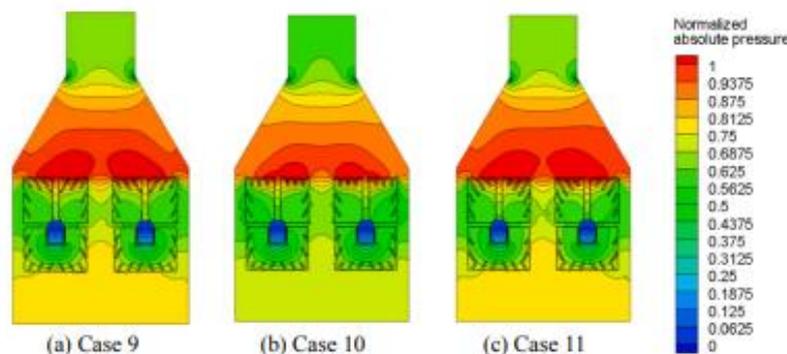
Akibatnya, penurunan tekanan antara saluran masuk atas dan ventilasi berkurang seiring dengan dihilangkannya tabung di sisi atas. Daerah bertekanan tinggi di depan bundel tabung menjadi lebih kecil karena tabung dihilangkan dari sisi atas dan dipindahkan ke sisi bawah.



Gambar 12. Distribusi Tekanan Absolut yang Dinormalisasi Untuk Pengaruh Jumlah Tabung (a) - (d) Sisi Atas dan Bawah, dan (e) - (h) Sisi Kiri dan Kanan (Gap et al., 2020)

3.5 Pengaruh Bentuk Bundel Tabung

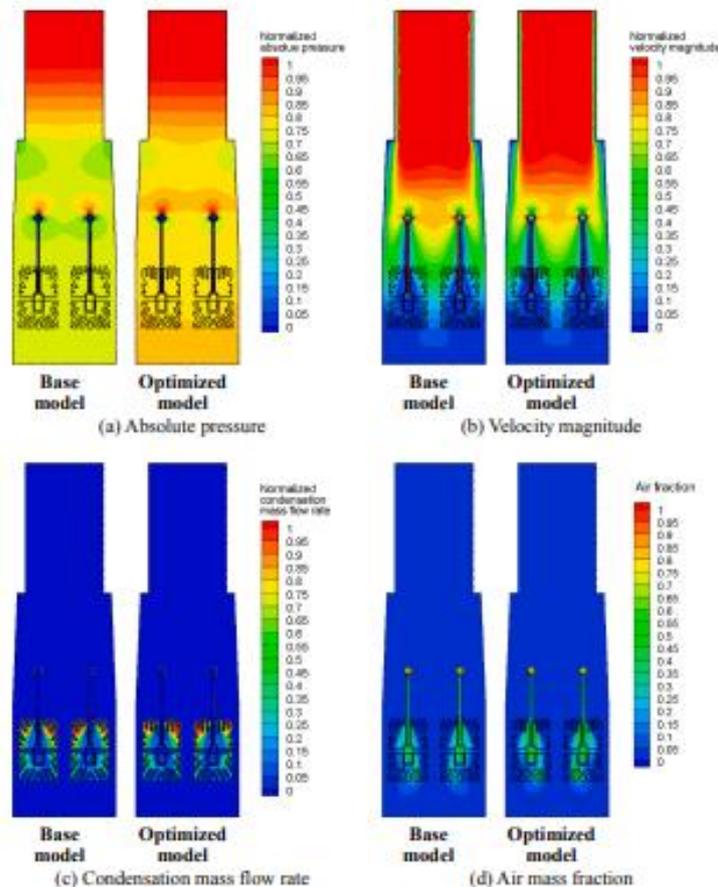
Pada Gambar 13 Untuk Kasus 09, distribusi tekanan absolut sedikit menurun karena bentuk bundel tabung dimodifikasi, dan karakteristik asimetris sedikit menurun seiring dengan meningkatnya aliran uap di tengah setiap bundel tabung. Untuk Kasus 10, tekanan absolut menurun dengan cepat di wilayah yang luas karena uap mudah menembus ke wilayah berpori ketika tabung di sisi atas dihilangkan dalam arah vertikal. Akibatnya, posisi puncak tinggi atau rendah adalah konstan, dan nilai rata-rata distribusi tekanan absolut pada daerah bertekanan tinggi menurun. Untuk Kasus 11, nilainya sedikit meningkat di sisi kanan karena asimetri, namun pola distribusi tekanan absolut serupa dengan Kasus 9. Namun, wilayah bertekanan tinggi dihasilkan di depan wilayah berpori, sehingga perubahan bentuk bundel tabung di sisi kiri atau kanan daerah bawah mempunyai pengaruh yang lebih kecil terhadap distribusi tekanan absolut lokal.



Gambar 13. Distribusi Tekanan Absolut Dinormalisasi Untuk Efek Bentuk Bundel Tabung (Gap et al., 2020)

Hasil pengujian pada Gambar 14 dengan jelas menunjukkan bahwa kinerja kondensor permukaan meningkat ketika bundel tabung diubah dari model dasar ke model optimal. Laju

aliran massa kondensasi serupa satu sama lain karena skalanya yang kecil, namun penurunan tekanan pada model yang dioptimalkan menurun hingga sekitar 40% dibandingkan dengan model dasar. Susunan tabung baru kemudian dikembangkan dengan hasil numerik dan eksperimen, yang secara signifikan meningkatkan kinerja kondensor.



Gambar 14. Hasil Simulasi Variasi Bundel Tabung Pada Penampang di Arah Z Model Dasar dan Model yang Dioptimalkan (Gap et al., 2020).

4. KESIMPULAN

Dari hasil evaluasi dan pemahaman terhadap review literatur jurnal mengenai pendinginan kondensor dengan fluida air dan udara, dapat disimpulkan bahwa pilihan antara pendinginan kondensor berpendingin udara dan berpendingin air melibatkan pertimbangan berbagai faktor, seperti ketersediaan dan biaya air, kebutuhan ruang, efisiensi pendinginan, dan pertimbangan kebisingan. Keduanya memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Pemilihan antara keduanya harus didasarkan pada kebutuhan spesifik dan kondisi aplikasinya. Meskipun pendinginan kondensor berpendingin udara lebih ekonomis dan cocok untuk daerah dengan ketersediaan air yang tinggi, kondisi sebaliknya juga berlaku. Kondensor berpendingin air lebih efisien tetapi memerlukan biaya operasional yang lebih tinggi dan membutuhkan ketersediaan air yang konstan. Oleh karena itu, pendekatan terbaik untuk mencapai pendinginan optimal pada kondensor adalah dengan menggabungkan kedua metode pendinginan. Namun, perlu diingat bahwa penggabungan pendinginan ini akan membawa biaya tambahan. Metode ini dapat lebih efektif digunakan di daerah beriklim kering dengan ketersediaan air yang rendah atau tidak stabil. Dalam konteks ini, pemilihan metode pendinginan yang tepat harus disesuaikan dengan kebutuhan spesifik dari pembangkit listrik tenaga uap dan karakteristik

lingkungan di sekitarnya. Meskipun penggabungan pendinginan mungkin memerlukan investasi tambahan, manfaatnya dapat dirasakan dalam bentuk efisiensi yang lebih tinggi dan ketersediaan pendinginan yang lebih stabil.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih saya ucapkan kepada prodi teknik mesin Institut Teknologi Nasional (ITENAS) Bandung yang telah banyak membantu dan memfasilitasi dalam penyusunan artikel ini, serta kepada rekan-rekan mahasiswa yang telah memberikan masukan berharga selama proses penulisan artikel ini. Walaupun artikel ini merupakan karya individu, dukungan kalian telah memperkaya dan memperbaiki kualitasnya. Terima kasih atas kontribusi pemikiran dan pandangan yang telah diberikan, semoga dapat terus saling memberikan inspirasi di kemudian hari.

DAFTAR RUJUKAN

- Akpan, P. U., & Fuls, W. F. (2019). Application and limits of a constant effectiveness model for predicting the pressure of steam condensers at off-design loads and cooling fluid temperatures. *Applied Thermal Engineering*, 158 (May), 113779. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113779>
- Bustamante, J. G., Rattner, A. S., & Garimella, S. (2016). Achieving near-water-cooled power plant performance with air-cooled condensers. *Applied Thermal Engineering*, 105, 362–371. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.05.065>
- Davies, W. A., & Hrnjak, P. (2020). Heat transfer and flow regimes during counter-flow steam condensation in flattened-tube air-cooled condensers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 147, 118930. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118930>
- Davies, W. A., Kang, Y., Hrnjak, P., & Jacobi, A. M. (2018). Method for evaluating the effect of inclination on the performance of large flattened-tube steam condensers with visualization of flow regimes. *Applied Thermal Engineering*, 138 (June 2017), 934–941. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.02.075>
- Davies, W. A., Kang, Y., Hrnjak, P., & Jacobi, A. M. (2019). Heat transfer and flow regimes in large flattened-tube steam condensers. *Applied Thermal Engineering*, 148 (October 2017), 722–733. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.079>
- Gap, Y., Youl, S., Min, Y., Yeong, M., Min, Y., & Soo, B. (2020). A study on the optimal arrangement of tube bundle for the performance enhancement of a steam turbine surface condenser. *Applied Thermal Engineering*, 166 (November 2019), 114681. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114681>

- He, W. F., Chen, J. J., Han, D., Wen, T., Luo, L. T., Li, R. Y., & Zhong, W. C. (2019). Numerical analysis from the rotational speed regulation within the fan array on the performance of an air-cooled steam condenser. *Applied Thermal Engineering*, *153*(29), 352–360. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.016>
- He, W. F., Dai, Y. P., Wang, J. F., Li, M. Q., & Ma, Q. Z. (2013). Performance prediction of an air-cooled steam condenser using UDF method. *Applied Thermal Engineering*, *50* (1), 1339–1350. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.06.020>
- Hegazy, A., Rothan, Y., & Engeda, A. (2016). Feasibility of using vapor compression refrigeration system for cooling steam plant condenser. *Applied Thermal Engineering*, *106*, 570–578. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.005>
- Laskowski, R. (2016). Relations for steam power plant condenser performance in off-design conditions in the function of inlet parameters and those relevant in reference conditions. *Applied Thermal Engineering*, *103*, 528–536. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.127>
- Lin, J., Mahvi, A. J., Kunke, T. S., & Garimella, S. (2020). Improving air-side heat transfer performance in air-cooled power plant condensers. *Applied Thermal Engineering*, *170* (September 2019), 114913. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.114913>
- Mahvi, A. J., Rattner, A. S., Lin, J., & Garimella, S. (2018). Challenges in predicting steam-side pressure drop and heat transfer in air-cooled power plant condensers. *Applied Thermal Engineering*, *133*, 396–406. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.008>
- Pattanayak, L., Padhi, B. N., & Kodamasingh, B. (2019). Thermal performance assessment of steam surface condenser. *Case Studies in Thermal Engineering*, *14* (September 2018), 100484. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100484>
- Pieve, M., & Salvadori, G. (2011). Performance of an air-cooled steam condenser for a waste-to-energy plant over its whole operating range. *Energy Conversion and Management*, *52*(4), 1908–1913. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.11.021>
- Porto-Hernandez, L. A., Vargas, J. V. C., Munoz, M. N., Galeano-Cabral, J., Ordonez, J. C., Balmant, W., & Mariano, A. B. (2023). Fundamental optimization of steam Rankine cycle power plants. *Energy Conversion and Management*, *289* (February), 117148. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117148>