

Jurnal Artikel

Analisis Komparatif *Open Feedwater Heater* dan *Closed Feedwater Heater* dalam Upaya Optimasi Siklus *Rankine*

Mukti Andika Febrianto ^{1*}, Maman Fathurahman ²

¹ Prodi Magister Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Bandung

² Prodi Magister Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Bandung

¹Email : mukti.andikafebrianto@gmail.com, ²Email : maman.faturahman@gmail.com

*Corresponding author – Email : mukti.andikafebrianto@gmail.com

Abstrak

Peningkatan kebutuhan energi listrik menuntut efisiensi termal yang lebih baik pada pembangkit listrik agar pasokan energi tetap stabil dan berkelanjutan. Salah satu cara meningkatkan efisiensi siklus Rankine adalah dengan memanfaatkan feedwater heater, yang menggunakan panas sisa untuk memanaskan air umpan sebelum masuk ke boiler. Artikel ini membahas perbedaan antara Open Feedwater Heater (OFWH) dan Closed Feedwater Heater (CFWH) serta dampaknya terhadap kinerja siklus Rankine. Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan feedwater heater dapat meningkatkan efisiensi termal hingga 2%, meskipun ada penurunan daya bersih akibat ekstraksi uap dari turbin. Studi ini merekomendasikan kombinasi OFWH dan CFWH untuk memaksimalkan efisiensi dan mengurangi konsumsi energi. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengintegrasikan teknologi ini dengan pembangkit berbasis energi terbarukan serta mengembangkan sistem pemantauan yang lebih canggih guna meningkatkan keandalan operasional.

Kata kunci: efisiensi termal, feedwater heater, siklus Rankine

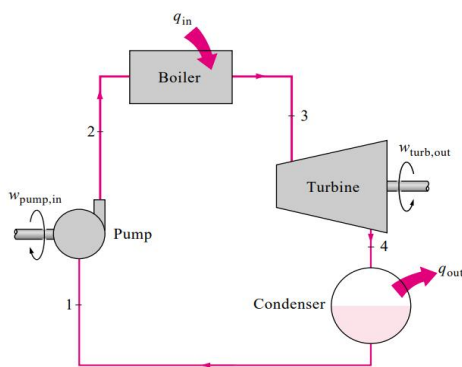
Abstract

Increasing demand for electrical energy requires improved thermal efficiency in power plants to ensure a stable and sustainable energy supply. One way to enhance the efficiency of the Rankine cycle is by utilizing a feedwater heater, which recovers waste heat to preheat the feedwater before entering the boiler. This article examines the differences between Open Feedwater Heater (OFWH) and Closed Feedwater Heater (CFWH) and their impact on Rankine cycle performance. The analysis results indicate that implementing a feedwater heater can improve thermal efficiency by up to 2%, although there is a reduction in net power due to steam extraction from the turbine. This study recommends combining OFWH and CFWH to maximize efficiency and reduce energy consumption. Further research is needed to integrate this technology with renewable energy-based power plants and develop more advanced monitoring systems to enhance operational reliability.

Keywords: thermal efficiency, feedwater heater, Rankine cycle

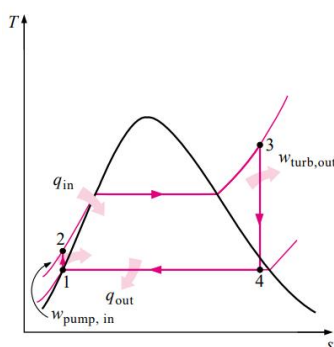
1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk dan berkembangnya teknologi. Salah satu sumber pembangkitan energi listrik yang banyak digunakan adalah pembangkit daya uap dengan siklus Rankine. Komponen utama pada siklus ini adalah boiler, turbin uap, kondensor dan pompa, skematik si-klus rankine dapat dilihat pada Gambar 1 Siklus ini mengubah energi panas menjadi energi kinetik untuk memutar genera-tor yang akhirnya dapat menghasilkan listrik. Seperti pada siklus lainnya, efisiensi siklus Rankine ini juga tidak dapat mencapai 100%, banyak energi yang hilang, baik dalam bentuk kebocoran sistem maupun panas buangan.



Gambar 1. Layout siklus Rankine sederhana

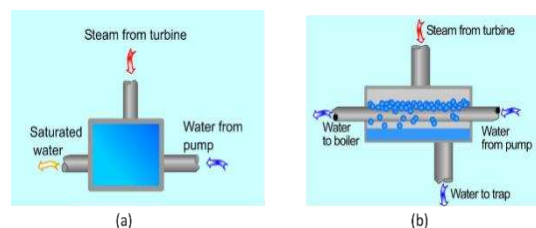
Analisis energi siklus Rankine dapat dilihat pada Gambar 2 Sehingga upaya untuk meningkatkan efisiensi siklus ini menjadi sangat penting, demi mengurangi konsumsi bahan bakar, energi panas yang terbuang serta emisi yang dilepaskan ke udara.



Gambar 2. Diagram T-s siklus Rankine Ideal

Salah satu upaya peningkatan efisiensi adalah dengan memanfaatkan panas buangan untuk memanaskan air umpan balik yang disebut teknologi feed-water heater. Teknologi ini memanfaatkan uap ekstraksi dari turbin untuk memanaskan air umpan balik sebelum masuk ke boiler. Dengan demikian dapat mengurangi kebutuhan energi di boiler, sehingga pada akhirnya dapat meningkatkan efisiensi keseluruhan siklus. *Feedwater heater* diklasifikasikan menjadi dua jenis utama, yaitu *Open Feed Water Heater (OFWH)* dan *Closed Feed Water Heater (CFWH)*. Meskipun keduanya sama fungsinya sebagai pemanas, namun dapat memberikan dampak yang berbeda terhadap efisiensi dan operasional sistem pembangkit listrik secara keseluruhan.

Perbedaan diantara kedua teknologi feedwater heater diatas adalah pada mekanisme perpindahan panas antara sumber panas dan media yang akan dipanaskan. Open feedwater heater memanaskan air umpan balik secara langsung dengan mencampurkan air dengan uap panas dari turbin. Sedangkan pada closed feedwater heater air umpan balik dilewatkan pada pipa kemudian uap panas dialirkan pada sekeliling pipa sehingga terjadi perpindahan panas dari uap ke air umpan balik. Perbandingan kedua sistem dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. (a) Open Feedwater Heater, (b) Closed Feedwater Heater

II. TINJAUAN PUSTAKA

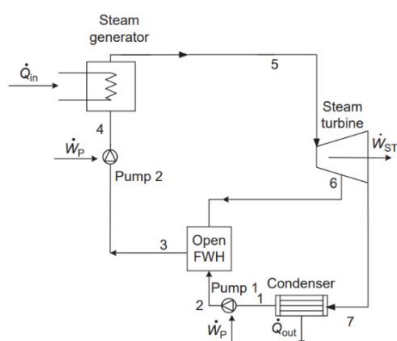
Pengaruh Penambahan *Feedwater Heater* pada Sistem Pembangkit Listrik

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi termal dengan memanfaatkan panas yang

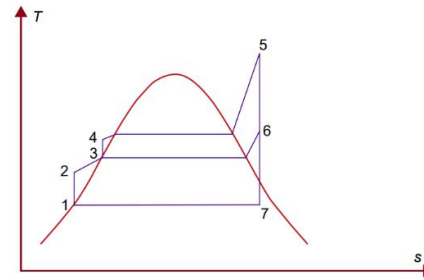
terbuang. Salah satu hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan feedwater heater dapat meningkatkan efisiensi sekitar 1% dari sebelum menggunakan feedwater heater. Jumlah feedwater heater juga dapat mempengaruhi besarnya peningkatan efisiensi termal, dalam penelitian lain penambahan jumlah feedwater heater dapat meningkatkan efisiensi sebesar 2% dari sebelumnya.

Analisis Open Feedwater Heater

Open Feedwater Heater (OFWH) adalah jenis *heat exchanger* atau penukar kalor dengan prinsip perpindahan kalor melalui kontak langsung antar dua zat dengan perbedaan temperatur. Jadi secara sederhana, OFWH ini seperti bejana yang mencampur uap panas ekstraksi dari turbin dengan air umpan balik, sehingga temperatur air umpan balik akan meningkat sebelum masuk ke *boiler*. Pencampuran secara langsung ini memungkinkan terjadinya penukaran kalor yang lebih efisien melalui mekanisme perindahan panas konveksi. Dalam kondisi pertukaran kalor yang ideal air akan keluar pemanas sebagai air jenuh yang kemudian akan diarahkan pada pemanas selanjutnya. Gambar 4 menunjukkan layout siklus Rankine dengan OFWH dan Gambar 5 analisis energinya.



Gambar 4. Siklus Rankine dengan OFWH

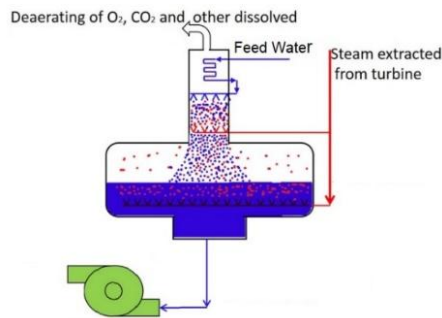


Gambar 5. Diagram T-s siklus Rankine dengan OFWH

Dalam siklus ini, air jenuh yang keluar dari kondensor diarahkan ke pompa pertama untuk dinaikkan tekanannya, seperti pada siklus Rankine sederhana (proses 1–2). Kemudian, aliran air masuk ke OFWH dan bercampur dengan sebagian uap yang diekstraksi dari turbin uap pada tahap tekanan intermediate (proses 2–3). Selanjutnya, air jenuh tersebut dipompa untuk dinaikkan tekanannya hingga mencapai tekanan *boiler* (proses 3–4). Di dalam *boiler*, seperti pada siklus Rankine sederhana, air ini dipanaskan hingga menjadi uap super panas sampai mencapai temperature masuk turbin (proses 4–5). Uap super panas kemudian mengembang di dalam turbin hingga mencapai tekanan ekstraksi (proses 5–6). Sebagian uap dikeluarkan dari turbin pada tahap intermediate dan masuk ke OFWH (proses 6–3), sementara sisanya tetap ekspansi di turbin untuk menghasilkan kerja (proses 6–7). Uap yang tersisa akhirnya masuk ke kondensor, melepaskan panas, dan kembali ke kondisi awal siklus (proses 7–1).

Penambahan OFWH meningkatkan efisiensi termal siklus dengan memanaskan awal air umpan balik sebelum masuk ke boiler, sehingga mengurangi energi yang dibutuhkan oleh boiler. Meskipun demikian, proses regenerasi ini sering disertai dengan penurunan output daya total dampak dari pengurangan jumlah uap yang dapat diekspansi secara penuh di turbin. Sistem OFWH ini memiliki konstruksi yang tidak rumit, sehingga biaya perawatan juga tidak

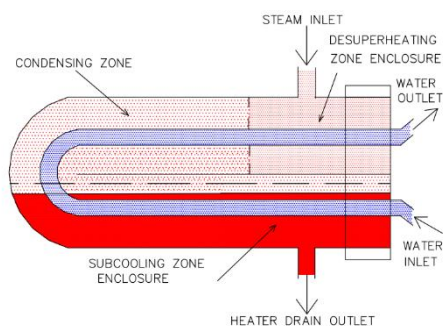
terlalu tinggi, ilustrasi sitem OFWH dapat dilihat pada Gambar 6



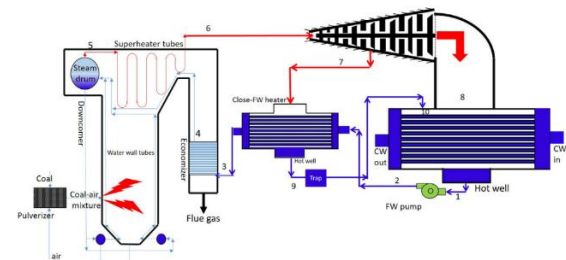
Gambar 6. Contoh skema *Open Feedwater Heater*

Analisis *Closed Feedwater Heater*

Berbeda dengan OFWH, *Closed Feedwater Heater* (CFWH) adalah feedwater heater tipe tertutup dengan prinsip tidak memungkinkan pencampuran langsung antara fluida. Dalam pembangkit listrik, alat ini pada dasarnya adalah penukar kalor tipe *shell-and-tube*, di mana temperatur air di dalam tabung (*tube*) meningkat dengan menerima panas dari ekstraksi uap yang terkumpul pada *shell*, dapat dilihat pada Gambar 7. Uap ekstraksi kemudian terkondensasi setelah melepaskan panasnya ke air umpan balik. Tidak seperti tipe terbuka, pada tipe tertutup, kedua media yang bertukar panas berada pada tekanan yang berbeda karena tidak saling bercampur.

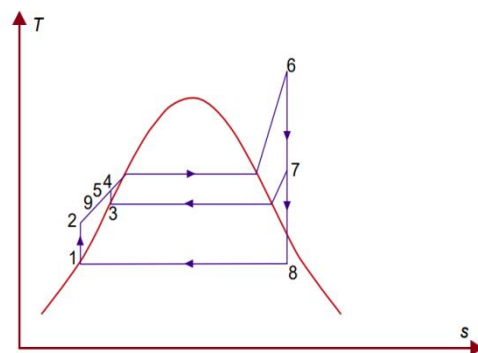


Gambar 7. Contoh mekanisme perpindahan kalor pada CFWH



Gambar 8. Siklus Rankine dengan CFWH

Siklus Rankine dengan CFWH sederhana dapat dilihat pada Gambar 8 dan analisis energinya ditunjukkan pada Gambar 9. Siklus ini dimulai dari air jenuh hasil kondensasi dan air umpan balik dipompa (proses 1–2) untuk meningkatkan tekanannya. Air ini kemudian masuk ke CFWH, air berada di dalam tabung, sedangkan uap ekstraksi turbin berada pada *shell*, terjadilah pertukaran kalor antara air dalam *tube* dan uap pada *shell* (proses 2–9). Setelah dipanaskan, air didalam *tube* ini selanjutnya akan ditransfer ke dalam *economizer*. Sedangkan kondensasi uap ekstraksi yang berada di dalam *shell* kembalikan ke kondensor untuk memastikan kondensasi sempurna. Selanjutnya air dari CFWH dipanaskan didalam boiler menjadi uap super panas, dialirkan ke turbin, sebagian uap diekstraksi untuk sistem CFWH dan sisanya untuk memutar turbin. Uap keluaran turbin dikondensasikan pada kondensor, begitu selanjutnya menjadi suatu siklus.



Gambar 9. Diagram T-s Siklus Rankine dengan CFWH

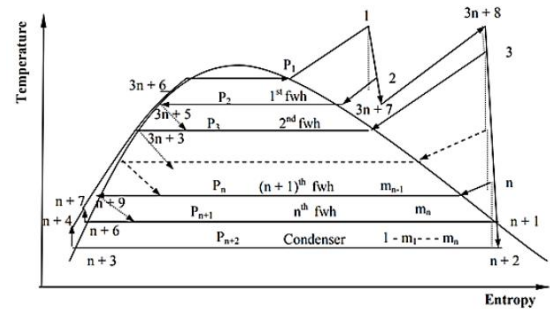
III. METODE PENELITIAN

Pada prakteknya pembangkit listrik tenaga uap dapat menggunakan salah satu atau keduanya dari tipe *feedwater heater* yang telah dijelaskan diatas. Disamping itu jumlah feedwater heater yang digunakan juga dapat bervariasi sesuai dengan kebutuhan dan karakteristik pembangkit listriknya. Penggunaan beberapa unit *feedwater heater* memungkinkan pengurangan energi yang harus dimasukkan ke dalam siklus, sehingga efisiensi termal dapat meningkat. Berdasarkan simulasi yang dilakukan, semakin banyak *feedwater heater* yang diterapkan, jumlah energi yang masuk ke siklus akan semakin kecil. Namun, peningkatan jumlah *feedwater heater* akan memiliki efek samping yaitu penurunan kerja net yang dihasilkan oleh sistem. Rekomendasi jumlah *feedwater heater* berdasarkan unit size dapat dilihat pada Tabel 1. Hal ini terjadi karena sebagian uap yang seharusnya menghasilkan kerja di turbin, diekstraksi untuk digunakan pada *feedwater heater*. Meskipun demikian, peningkatan efisiensi termal siklus tetap terjadi, meski dengan penurunan kerja net tersebut.

Tabel 1. Rekomendasi jumlah feedwater berdasarkan kapasitas pembangkitan

Unit Size (MW)	Jumlah Feedwater Heater
0 – 50	3 – 5
50 – 100	5 atau 6
100 – 200	5 – 7
Diatas 200	6 – 8

Diagram T-s siklus Rankine dengan beberapa feedwater heater menunjukkan bahwa temperatur fluida meningkat sebelum masuk ke *boiler*, yang membantu mengurangi kebutuhan kalor dari sumber eksternal, seperti pada Gambar 10.



Gambar 10. Diagram T-s siklus Rankine dengan beberapa Feedwater Heater

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perbandingan Feedwater Heater

Ketika membandingkan *Feedwater Heater* tipe terbuka dengan tipe tertutup, dapat dinyatakan bahwa CFWH lebih mahal karena desainnya yang kompleks dan kontrol parameter yang rumit. Karena aliran uap dan air umpan balik tidak boleh tercampur di dalam CFWH, maka tidak diperlukan pompa tambahan untuk setiap CFWH. Pompa ini dibutuhkan guna meningkatkan tekanan air umpan balik agar sesuai dengan kebutuhan tekanan tahap berikutnya. Pembangkit listrik modern umumnya menggunakan CFWH, dengan hanya satu OFWH yang berfungsi sebagai deaerator. Namun, penting untuk mempertimbangkan kemungkinan kegagalan, seperti kebocoran tabung pemanas baik pada CFWH maupun OFWH, yang memerlukan sistem drainase darurat. Dari segi efisiensi pembangkit, efisiensi termal CFWH hampir sama dengan OFWH. Namun, terkait output daya, CFWH menghasilkan daya yang lebih rendah dibandingkan OFWH. Perbandingan antara kedua tipe *Feedwater Heater* dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbedaan OFWH dan CFWH

Open Feedwater Heater	Closed Feedwater Heater
Konstruksi sederhana	Konstruksi lebih rumit
Parameter kontrol	Parameter kontrol

lebih sedikit	lebih banyak
Lebih banyak membutuhkan pompa untuk setiap penambahan unit <i>heater</i>	Lebih sedikit membutuhkan pompa untuk setiap penambahan jumlah unit <i>heater</i>
Membutuhkan area lebih sedikit	Membutuhkan area lebih luas
Bekerja pada tekanan turbin intermediate kebawah	Dapat bekerja pada berbagai tekanan ekstraksi turbin

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, terdapat beberapa rekomendasi yang dapat dipertimbangkan untuk pengembangan dan penerapan *feedwater heater* dalam siklus Rankine di masa depan:

Penggunaan kombinasi OFWH dan CFWH. Studi lebih lanjut dapat difokuskan pada pengembangan sistem hybrid yang menggabungkan keunggulan *Open Feedwater Heater (OFWH)* dan *Closed Feedwater Heater (CFWH)*. Kombinasi ini berpotensi mengoptimalkan efisiensi termal sambil tetap mempertahankan fleksibilitas operasi. Sistem hybrid juga dapat membantu mengurangi kompleksitas sistem dan biaya perawatan, terutama pada pembangkit listrik berkapasitas besar.

Optimasi jumlah *feedwater heater*. Penambahan jumlah *feedwater heater* telah terbukti meningkatkan efisiensi termal, namun efek samping dari penurunan daya bersih yang dihasilkan oleh sistem perlu dipertimbangkan. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut tentang optimasi jumlah *feedwater heater* yang dapat diterapkan sesuai dengan kapasitas pembangkit sangat diperlukan untuk menyeimbangkan antara efisiensi dan daya keluaran.

Pemanfaatan teknologi inovatif untuk meningkatkan efisiensi. Penelitian lebih lanjut dapat difokuskan pada pemanfaatan teknologi baru, seperti *advanced heat exchangers* atau penggunaan material dengan konduktivitas panas yang lebih tinggi, untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas di dalam *feedwater heater*. Teknologi ini berpotensi mengurangi ukuran fisik *feedwater heater* dan meningkatkan performa termal, terutama pada sistem CFWH.

Integrasi dengan sistem energi terbarukan. Dengan meningkatnya adopsi energi terbarukan, seperti tenaga surya dan biomassa, siklus Rankine dengan *feedwater heater* dapat diintegrasikan dengan pembangkit listrik tenaga surya atau biomassa untuk meningkatkan efisiensi keseluruhan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengkaji bagaimana *feedwater heater* dapat dioptimalkan dalam konteks ini, terutama dalam hal sinkronisasi operasional dan pemanfaatan energi.

Peningkatan sistem pemantauan dan deteksi dini untuk meningkatkan kehandalan. Meskipun CFWH memiliki efisiensi termal yang tinggi, masalah kebocoran pada tabung pemanas tetap menjadi tantangan. Oleh karena itu, pengembangan sistem pemantauan real-time yang lebih canggih serta teknik diagnostik prediktif dapat membantu mengurangi downtime dan meningkatkan keandalan sistem *feedwater heater* dalam jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- Barszcz, T., & Czop, P. (2011). A *feedwater heater* model intended for model-based diagnostics of power plant installations. *Applied Thermal Engineering*, 31(8–9), 1357–1367.
- Chantasiriwan, S. (2021). Comparative thermo-economic analysis of regenerative Rankine cycles with two *feed water heaters*. *Case Studies in*

- Thermal Engineering*, 28.
- Chen, H., Zhang, M., Chen, Z., Xu, G., Han, W., Liu, W., & Liu, T. (2020). Performance analysis and operation strategy of an improved waste-to-energy system incorporated with a coal-fired power unit based on feedwater heating. *Applied Thermal Engineering*, 178.
- Díaz Pérez, Á. A., Escobar Palacio, J. C., Venturini, O. J., Martínez Reyes, A. M., Rúa Orozco, D. J., Silva Lora, E. E., & Almazán del Olmo, O. A. (2018). Thermodynamic and economic evaluation of reheat and regeneration alternatives in cogeneration systems of the Brazilian sugarcane and alcohol sector. *Energy*, 152, 247–262.
- Dincer, I., & Demir, M. E. (2018). Steam and Organic Rankine Cycles. In *Comprehensive Energy Systems: Volumes 1-5* (Vol. 4, pp. V4-264-V4-311).
- Ebrahimi, M. (2023). Steam power plant, design. In *Power Generation Technologies* (pp. 99–203).
- Han, X., Chen, N., Yan, J., Liu, J., Liu, M., & Karellas, S. (2019). Thermodynamic analysis and life cycle assessment of supercritical pulverized coal-fired power plant integrated with No.0 feedwater pre-heater under partial loads. *Journal of Cleaner Production*, 233, 1106–1122.
- Nikbakht Naserabad, S., Mehrpanahi, A., & Ahmadi, G. (2019). Multi-objective optimization of feed-water heater arrangement options in a steam power plant repowering. *Journal of Cleaner Production*, 220, 253–270.
- Oyedepo, S. O., Fakeye, B. A., Mabinuori, B., Babalola, P. O., Leramo, R. O., Kilanko, O., Dirisu, J. O., Udo, M., Efemwenkikie, U. K., & Oyeboji, J. A. (2020). Thermodynamics analysis and performance optimization of a reheat – Regenerative steam turbine power plant with feed water heaters. *Fuel*, 280.
- Polski, C., Polski, T., Roman, J., Wróblewski, R., Bartoszewicz, J., & Ceran, B. (2024). A novel concept to improve the flexibility of steam power plants using an electric feedwater heater. *Applied Thermal Engineering*, 236.
- Stevanovic, V. D., Ilic, M., Djurovic, Z., Wala, T., Muszynski, S., & Gajic, I. (2018). Primary control reserve of electric power by feedwater flow rate change through an additional economizer – A case study of the thermal power plant “Nikola Tesla B.” *Energy*, 147, 782–798.
- Tan, H., Cao, R., Wang, S., Wang, Y., Deng, S., & Duić, N. (2021). Proposal and techno-economic analysis of a novel system for waste heat recovery and water saving in coal-fired power plants: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 281.
- Xu, J. Q., Yang, T., Sun, Y. Y., Zhou, K. Y., & Shi, Y. F. (2014). Research on varying condition characteristic of feedwater heater considering liquid level. *Applied Thermal Engineering*, 67(1–2), 179–189.