

Review Penggunaan *Feedwater Heater* Pada Pembangkit Tenaga Uap

Muhammad Fuad Abdul Hakim^{1*}, Dani Rusirawan²

¹Mahasiswa Prodi Magister Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Bandung
Jl. Phh. Mustofa No. 23 Neglasari, Cibeunying Kaler, Kota Bandung, Jawa Barat, Indonesia

²Prodi Magister Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Bandung
Jl. Phh. Mustofa No. 23 Neglasari, Cibeunying Kaler, Kota Bandung, Jawa Barat, Indonesia

*Corresponding author: muhammadfuad.a.hakim@gmail.com

Abstract

Steam power generation activities have an impact on increasing the temperature of the earth's surface. Switching generators from conventional energy to renewable energy takes time. Therefore, efforts are needed to optimize steam power plants as a short-term solution, especially in the heat addition process to make it more efficient. One optimization effort is using a feedwater heater, which can increase the temperature of the fluid before it enters the boiler, thereby reducing the amount of heat added. This article aims to review research on the use of feedwater heaters. The review is structured based on several discussion topics, namely the effect of using feedwater heaters in steam power plants, the effect of the number and configuration of feedwater heaters, the use of low and high pressure feedwater heaters, optimization of feedwater heaters, and the combination of feedwater heaters with other units, one of which is a solar collector. As a result, several further research topics related to feedwater heaters are proposed as alternative developments to existing research.

Keywords: boiler, efficiency, heat, optimization, temperature

Abstrak

Aktivitas pembangkit tenaga uap berdampak pada naiknya temperatur permukaan bumi. Peralihan pembangkit yang bersumber dari energi konvensional menuju energi terbarukan memerlukan waktu. Maka, diperlukan upaya optimasi pembangkit tenaga uap sebagai solusi jangka pendek, terutama pada proses penambahan kalor agar lebih efisien. Salah satu upaya optimasi yaitu penggunaan *feedwater heater*, dimana dapat meningkatkan temperatur fluida sebelum masuk ke boiler sehingga mengurangi jumlah kalor yang ditambahkan. Artikel ini bertujuan untuk me-review penelitian-penelitian tentang penggunaan *feedwater heater*. Review disusun berdasarkan beberapa topik pembahasan yaitu pengaruh penggunaan *feedwater heater* pada pembangkit tenaga uap, pengaruh jumlah dan konfigurasi *feedwater heater*, penggunaan *low and high pressure feedwater heater*, optimasi *feedwater heater*, serta kombinasi *feedwater heater* dengan unit lain, salah satunya dengan *solar collector*. Sebagai kelurannya, beberapa topik penelitian selanjutnya terkait *feedwater heater* diusulkan sebagai alternatif pengembangan dari penelitian yang sudah ada.

Kata kunci: boiler, efisiensi, kalor, optimasi, temperatur

1. Pendahuluan

Dalam kurun waktu terakhir, pembangkit listrik dari energi baru dan terbarukan sedang menjadi prioritas untuk dikembangkan sebagai pengganti dari pembangkit listrik energi konvensional khususnya pembangkit listrik dari tenaga uap. Diantara pembangkit listrik dari energi baru dan terbarukan yaitu pembangkit listrik tenaga angin, pembangkit listrik tenaga air dan pembangkit listrik tenaga surya. Hal ini sejalan dengan komitmen mengurangi naiknya temperatur permukaan bumi akibat efek rumah kaca yang salah satu penyumbangannya yaitu dari aktivitas

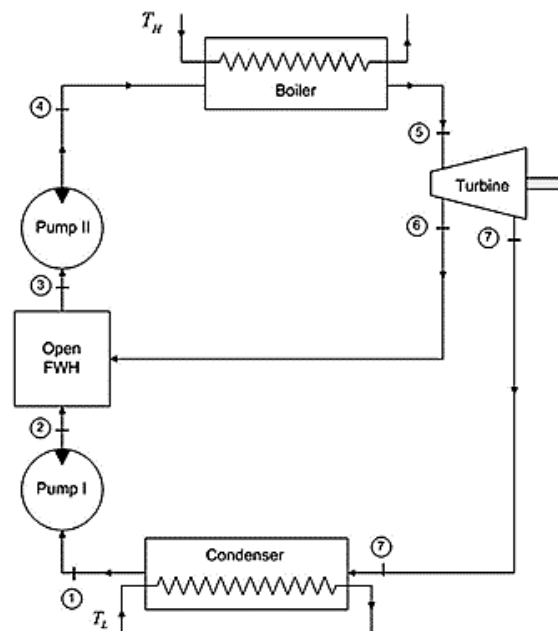
pembangkit tenaga uap. Penggunaan bahan bakar fosil pada pembangkit tenaga uap dapat menimbulkan dampak negatif pada lingkungan [1]. Akan tetapi untuk menggantikan pembangkit tenaga uap dibutuhkan waktu cukup lama, sehingga perlu dilakukan upaya jangka pendek untuk mengurangi efek negatif terhadap lingkungan dari aktivitas pembangkit tenaga uap. Upaya optimasi pembangkit tenaga uap agar kebutuhan penambahan kalor pada proses pemanasan fluida menjadi lebih efisien merupakan salah satu solusi jangka pendek yang dapat ditempuh. Penambahan kalor berkaitan dengan konsumsi batu bara pada pembangkit tenaga uap. Dengan

mengefisienkan kebutuhan penambahan kalor maka konsumsi batu bara yang dibutuhkan untuk aktivitas pembangkit tenaga uap dapat ditekan. Konsumsi batu bara yang dapat dikurangi berujung pada meningkatnya efisiensi termal siklus pembangkit tenaga uap [2].

Diantara beberapa cara yang digunakan untuk meningkatkan efisiensi termal dari pembangkit tenaga uap salah satunya adalah pemanasan regeneratif [3], yaitu dengan *feedwater heater* yang merupakan sejenis penukar kalor (*heat exchanger*). Penukar kalor tersebut memindahkan panas dari aliran fase uap ke aliran fase cair yang menuju boiler [4]. Secara prinsip, *feedwater heater* memanfaatkan panas dari sebagian hasil ekstraksi turbin untuk memanaskan aliran fluida sebelum memasuki boiler [5]. Dengan demikian, penambahan kalor atau konsumsi batu bara yang dibutuhkan menjadi berkurang sehingga efisiensi termal dapat meningkat.

Adapun *feedwater heater* dapat dikelompokkan menjadi dua jenis yaitu *open feedwater heater* dan *closed feedwater heater*. Untuk jenis yang pertama, *open feedwater heater* merupakan suatu alat penukar kalor dengan memanfaatkan kontak langsung antara aliran-aliran fluida yang memiliki perbedaan temperatur. Aliran-aliran fluida tersebut bercampur menjadi satu aliran yang memiliki temperatur tersendiri. Temperatur tersebut besarnya diantara temperatur terendah dan temperatur tertinggi dari aliran-aliran fluida yang bercampur. *Open feedwater heater* relatif sederhana dan memiliki kapasitas perpindahan panas yang baik [6]. Pada siklus dengan *open feedwater heater*, uap memasuki turbin tingkat pertama sehingga mengalami ekspansi. Sebagian aliran uap yang diekstraksi dari turbin pertama, umumnya pada kondisi uap *superheated* [7], ditarik ke dalam *open feedwater heater*, sebagian sisanya diekspansi pada turbin tingkat kedua. Keluaran dari turbin tingkat kedua masuk ke dalam kondenser sehingga menjadi kondisi cair jenuh, yang kemudian

dipompa menuju *open feedwater heater* sehingga bercampur dan kemudian dipompa menuju boiler. Dengan demikian penambahan kalor yang dilakukan pada boiler menjadi berkurang karena temperatur aliran fluida yang masuk sudah memiliki temperatur yang tinggi. Siklus *open feedwater heater* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Siklus *open feedwater heater* [8]

Sedangkan jenis yang kedua, *closed feedwater heater* merupakan suatu penukar kalor tertutup dimana temperatur aliran fluida meningkat dengan terjadinya kondensasi uap pada bagian luar pipa-pipa yang mengalirkan fluida. Dengan kata lain pada *closed feedwater heater* tidak terjadi pencampuran fluida [9]. Pada siklus ini, aliran uap melewati turbin tingkat pertama dan berekspansi, dimana sebagian aliran dialihkan ke dalam *closed feedwater heater* sehingga terjadi kondensasi uap sampai kondisi cair jenuh. Kondensat selanjutnya terperangkap pada kondenser dan bergabung dengan aliran yang melauhi turbin tingkat kedua. Aliran dari kondenser kemudian dipompa menuju *closed feedwater heater* sehingga temperatur meningkat sebelum nantinya menuju boiler. Dengan demikian penambahan kalor yang dilakukan pada boiler menjadi berkurang.

Siklus *closed feedwater heater* dapat dilihat pada Gambar 2.

Adapun perbandingan dari *open feedwater heater* dan *closed feedwater heater* dari disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan *open* dan *closed feedwater heater*

Jenis	Keterangan
<i>Open feedwater heater</i>	- Siklus sederhana - Membutuhkan area yang luas - Membutuhkan pompa untuk setiap penambahan unit <i>feedwater heater</i>
<i>Closed feedwater heater</i>	- Siklus lebih rumit - Membutuhkan area yang lebih kecil - Membutuhkan pompa yang minimum meski jumlah unit <i>feedwater heater</i> banyak

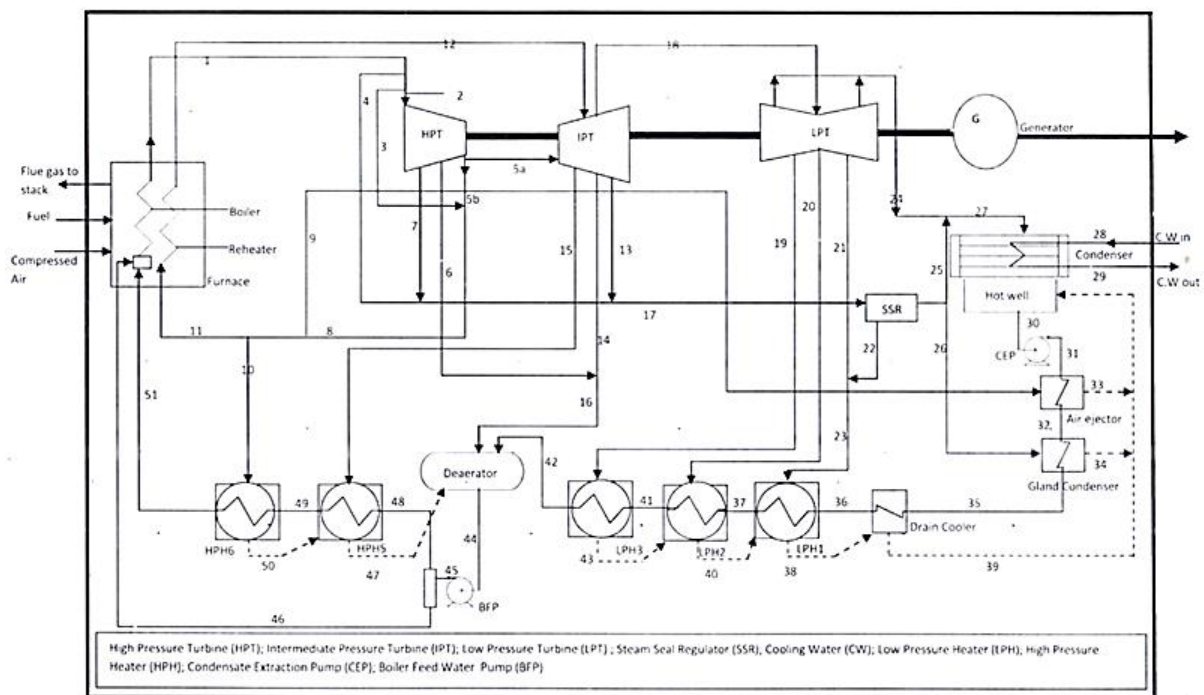
Feedwater heater dapat meningkatkan efisiensi termal pada siklus Rankine [11]. Jenis *feedwater heater* yang digunakan pada siklus tersebut, bisa mendapatkan peningkatan efisiensi termal atau parameter lainnya yang berbeda. Termasuk jumlah *feedwater heater*, posisi

feedwater heater, konfigurasi *feedwater heater* dan sebagainya. Pada jurnal ini akan me-review topik mengenai *feedwater heater* yang digunakan pada pembangkit tenaga uap. Tujuannya yaitu untuk memetakan penelitian-penelitian yang sudah ada saat ini, sehingga diketahui sudah sampai sejauh mana dan pada akhirnya dapat diusulkan bahasan penelitian selanjutnya yang masih berkaitan dengan *feedwater heater*.

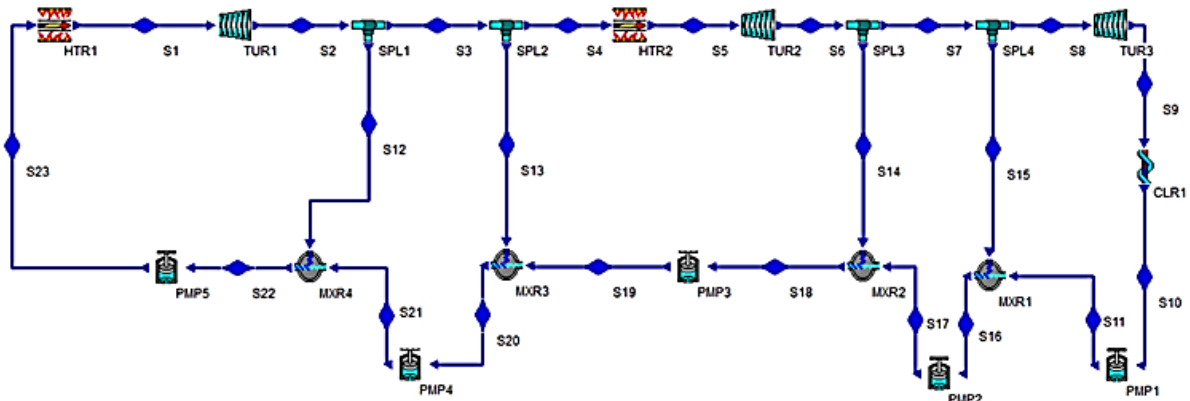
2. Review Literatur

2.1 Pengaruh Penggunaan *Feedwater Heater*

Penggunaan *feedwater heater* pada siklus pembangkit tenaga uap menjadi salah satu pemegang peranan penting dalam meningkatkan efisiensi termal [12] meskipun hanya satu unit. Penelitian [13] menunjukkan bahwa dari siklus pembangkit tenaga uap tanpa *feedwater heater* mengalami peningkatan efisiensi termal sebesar 1,01% setelah ditambahkan satu unit *feedwater heater*. Pada penelitian yang lain [14], penambahan *feedwater heater* pada siklus pembangkit tenaga uap dapat meningkatkan efisiensi termal sebesar 2,2%.



Gambar 2. Siklus *closed feedwater heater* [10]



Gambar 3. Siklus dengan 4 unit *closed feedwater heater* menggunakan CyclePad [10]

2.2 Pengaruh Jumlah *Feedwater Heater*

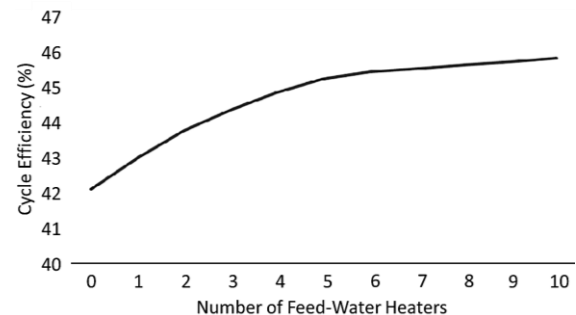
Dalam suatu pembangkit tenaga uap dapat digunakan beberapa unit *feedwater heater*. Jumlah *feedwater heater* yang digunakan akan mempengaruhi performa dari pembangkit tenaga uap tersebut. Pada penelitian [10] dan [15] diselidiki pengaruh dari jumlah *feedwater heater* pada performa pembangkit tenaga uap. Egbin Power Plant kapasitas 220 MW menjadi tempat studi kasus pada penelitian tersebut. Jenis *closed feedwater* digunakan dengan variasi jumlah dari 0 sampai 10 unit. Digunakan *software* CyclePad untuk membantu simulasi dalam mendapatkan parameter performa termodinamika yang dibutuhkan.

Pada Gambar 3 ditunjukkan siklus dengan 4 unit *closed feedwater heater*, disimbolkan dengan MXR1, MXR2, MXR3 dan MXR4, menggunakan CyclePad. Adapun parameter utama yang diselidiki yaitu efisiensi termal, dimana merupakan kerja net yang dihasilkan dibandingkan dengan jumlah kalor yang dimasukkan ke siklus. Secara teori penggunaan *feedwater heater* dapat mengurangi jumlah kalor yang dimasukkan ke siklus sehingga efisiensi termal meningkat.

Dari hasil simulasi diketahui bahwa semakin banyak unit *feedwater heater*, jumlah kalor yang dimasukkan ke siklus semakin berkurang. Namun, kerja net yang dihasilkan pun berkurang seiring dengan bertambahnya unit *feedwater heater* yang digunakan. Hal ini disebabkan karena hasil ekstraksi turbin sebagian dialirkan ke *feedwater heater*. Meskipun demikian,

secara efisiensi termal siklus mengalami peningkatan disetiap penambahan unit *feedwater heater*.

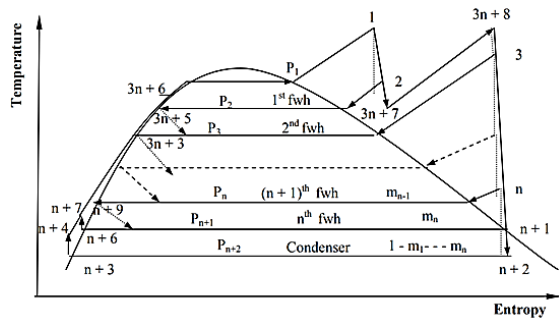
Dari Gambar 4, yang mana berupa grafik dengan sumbu x merupakan jumlah *feedwater heater* dan sumbu y merupakan efisiensi siklus, dapat diketahui bahwa, meskipun efisiensi termal selalu meningkat setiap penambahan unit *feedwater heater*, tetapi pada penggunaan lebih dari 5 unit *feedwater heater* sudah tidak memberikan peningkatan efisiensi termal yang signifikan. Sehingga dapat dikatakan 5 unit *feedwater heater* merupakan jumlah yang optimal.



Gambar 4. Efisiensi termal pada setiap jumlah *feedwater heater* [10]

Sebelumnya pada penelitian yang lain [16], Srinivas dkk. juga menyelidiki pengaruh jumlah *feedwater heater* pada siklus pembangkit tenaga uap, dengan formulasi matematika. Jenis yang digunakan yaitu *closed feedwater heater*. Pada Gambar 5 ditunjukkan diagram T-s dari siklus dengan jumlah 'n' *feedwater heater*, dimana dapat diketahui bahwa dengan bertambahnya jumlah *feedwater heater*

maka temperatur fluida mengalami peningkatan sebelum masuk boiler.



Gambar 5. Diagram T-s dari siklus dengan jumlah 'n' feedwater heater [16]

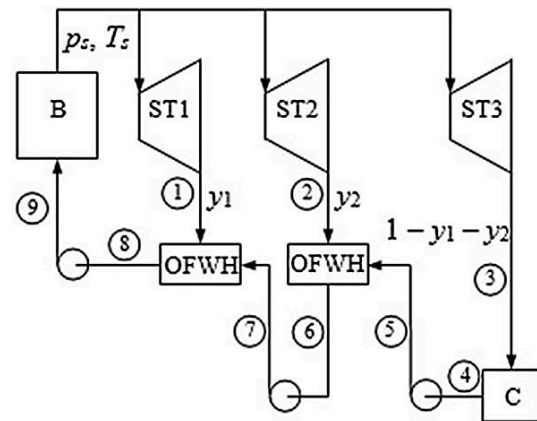
Dari penelitian tersebut disebutkan bahwa peningkatan efisiensi siklus terbesar terjadi pada penggunaan tunggal feedwater heater. Peningkatan efisiensi yang didapatkan menurun seiring dengan bertambahnya jumlah unit feedwater heater. Pada siklus Rankine yang beroperasi pada maximum steam pressure 8,5 MPa, jumlah optimal feedwater heater adalah 3 unit [17]. Untuk siklus pembangkit tenaga uap dengan maximum steam pressure 17-35 MPa, jumlah feedwater heater dapat mencapai 6 atau 7 unit. [18].

Dengan demikian penggunaan dari feedwater heater memiliki jumlah optimum dimana terjadi peningkatan efisiensi termal terbesar. Penambahan feedwater heater melebihi jumlah optimum tidak memberikan peningkatan efisiensi termal yang signifikan. Adapun jumlah optimum feedwater heater dapat berbeda dari setiap siklus pembangkit tenaga uap.

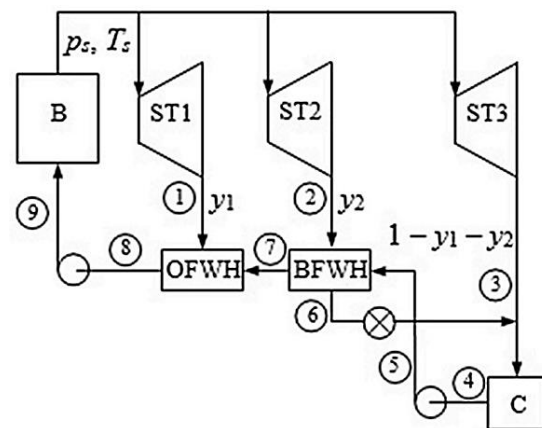
2.3 Pengaruh Konfigurasi Feedwater Heater

Dengan adanya dua jenis feedwater heater, yaitu open feedwater heater dan closed feedwater heater, maka dimungkinkan beberapa konfigurasi dari keduanya pada penggunaan di siklus pembangkit tenaga uap. Penelitian [19] dilakukan untuk membandingkan beberapa konfigurasi feedwater heater yang memungkinkan bisa diaplikasikan. Pada penelitian tersebut dibatasi jumlah feedwater heater yaitu hanya dua unit.

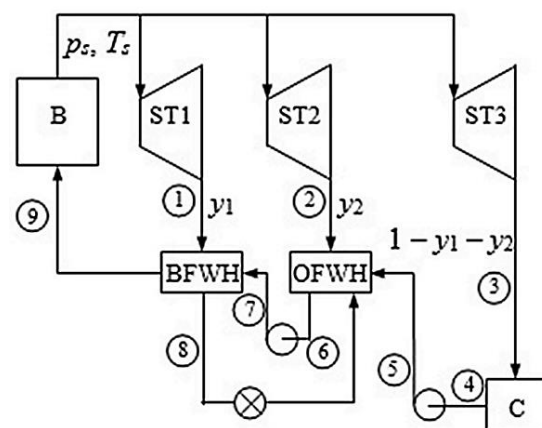
Konfigurasi pertama yaitu dua unit open feedwater heater (OFWH-OFWH). Konfigurasi kedua yaitu open feedwater heater diletakkan sebelum closed feedwater heater (OFWH-BFWH). Konfigurasi ketiga yaitu closed feedwater heater diletakkan sebelum open feedwater heater (BFWH-OFWH). Gambar 6 menunjukkan konfigurasi ketiga siklus tersebut.



(a)



(b)



(c)

Gambar 6. Konfigurasi (a) OFWH-OFWH (b) OFWH-BFWH (c) BFWH-OFWH [19]

Konfigurasi OFWH-OFWH dijadikan referensi untuk konfigurasi lainnya. Hasilnya konfigurasi OFWH-OFWH memiliki efisiensi termal sebesar 34,64% dengan luas area *feedwater heater* (A) 94 m². Adapun untuk konfigurasi OFWH-BFWH dan BFWH-OFWH agar mencapai efisiensi termal yang sama dengan konfigurasi OFWH-OFWH maka harus memiliki luas area *feedwater heater* berturut-turut yaitu 137 m² dan 198 m². Dengan demikian konfigurasi OFWH-OFWH biaya instalasinya termurah karena memiliki luas area *feedwater heater* paling kecil dibandingkan dengan konfigurasi lainnya.

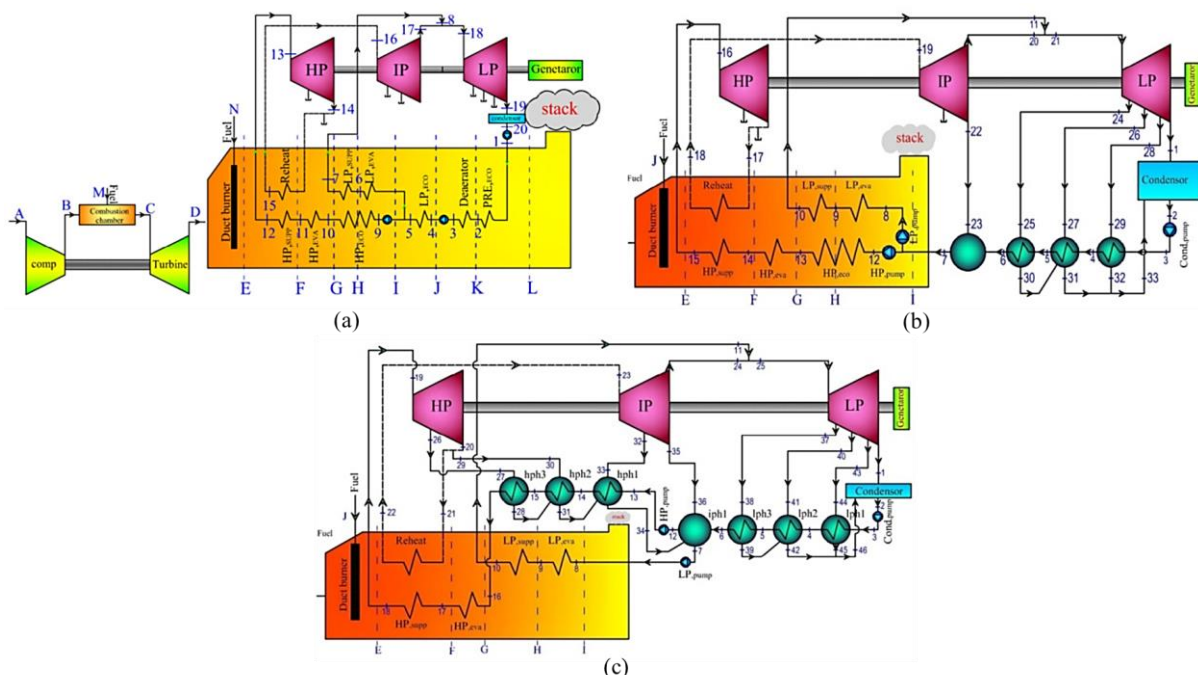
2.4 Pengaruh Penggunaan Low and High Pressure Feedwater Heater

Pada sistem pembangkit tenaga uap yang terdapat *feedwater heater*, maka jumlah turbin yang digunakan yaitu lebih dari satu. Turbin tingkat pertama menerima uap bertekanan tinggi (*high pressure*), sedangkan turbin selanjutnya menerima uap dengan tekanan relatif lebih rendah (*low pressure*). Karena *feedwater heater* mengambil aliran fluida dari sebagian ekstraksi setiap tingkatan turbin, maka ada klasifikasi *low pressure feedwater heater*

(LPH) dan *high pressure feedwater heater* (HPH).

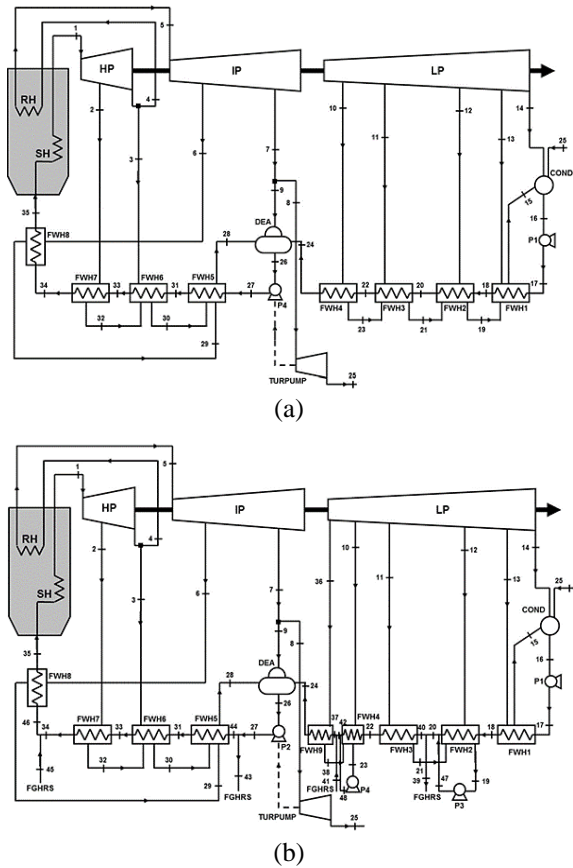
Pada penelitian [20], dilakukan kajian untuk mengetahui pengaruh penggunaan LPH dan HPH pada suatu siklus pembangkit tenaga uap. Penelitian dilakukan berdasarkan data sebuah pembangkit tenaga uap 1280 MW di Bandar Abbas, Iran. Tiga kasus atau skenario siklus disimulasikan. Kasus pertama yaitu siklus tanpa menggunakan LPH dan HPH. Kasus kedua yaitu siklus dengan menggunakan LPH. Kasus ketiga yaitu siklus dengan menggunakan LPH dan HPH. Skema setiap kasus dapat dilihat pada Gambar 7. LPH dan HPH disimbolkan dengan bentuk lingkaran berwarna hijau.

Dari penelitian tersebut diketahui bahwa, kasus 2 yaitu siklus dengan menggunakan LPH menghasilkan kerja net terbesar relatif dengan kasus 1 dan 3 yaitu 815,6 MW. Adapun untuk kasus 1 dan 3 menghasilkan kerja net berturut-turut yaitu 767,7 MW dan 784,8 MW. Dapat diketahui juga bahwa untuk siklus tanpa *feedwater heater* yaitu kasus 1, menghasilkan kerja net yang lebih kecil dibandingkan dengan siklus yang menggunakan *feedwater heater* yaitu kasus 2 dan 3.



Gambar 7. Skema (a) tanpa LPH dan HPH, (b) dengan LPH, (c) dengan LPH dan HPH [20]

2.5 Optimasi Feedwater Heater

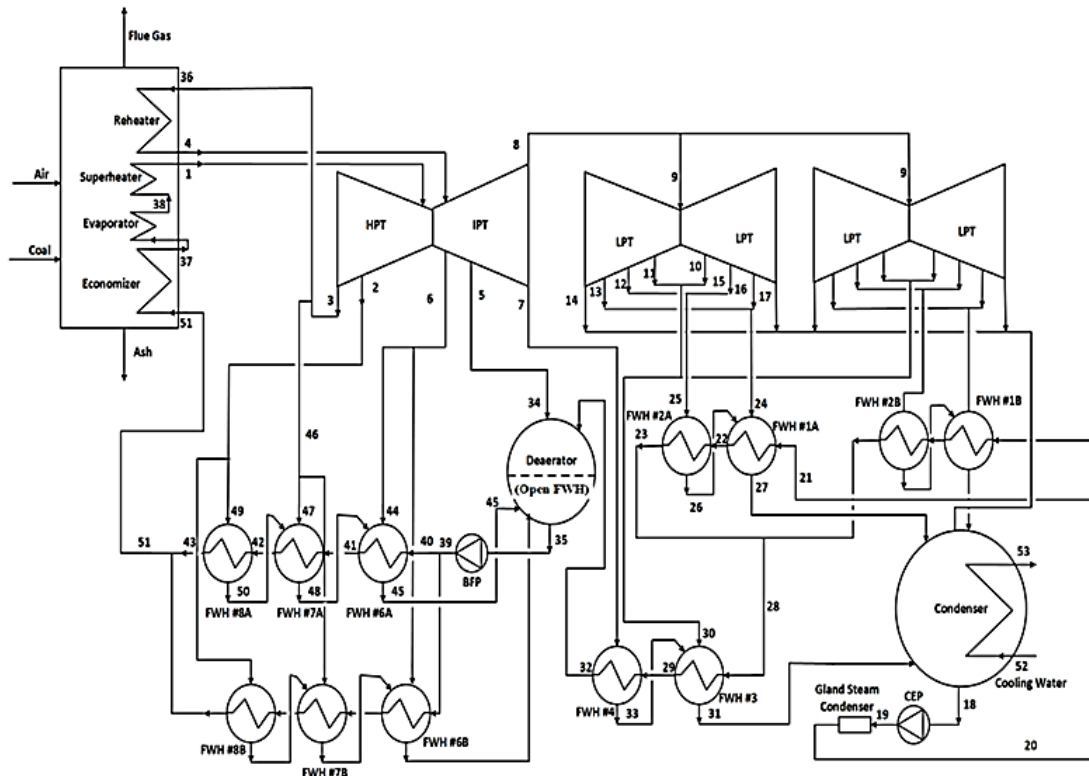


Gambar 8. Siklus pembangkit tenaga uap (a) sebelum optimasi (b) sesudah optimasi [21]

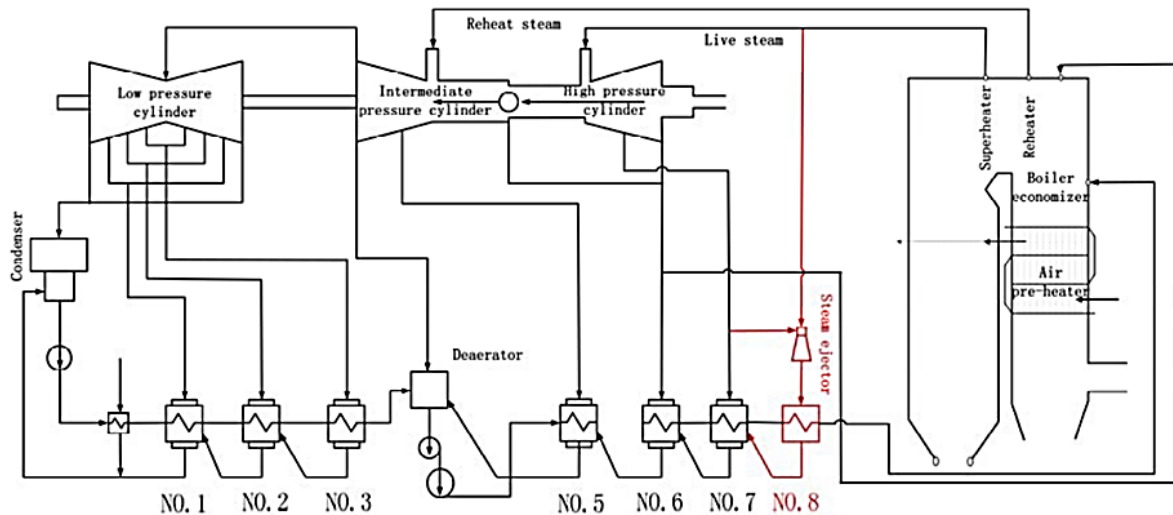
Sebuah siklus pembangkit tenaga uap yang telah menggunakan *feedwater heater*, dapat dioptimasi sehingga menghasilkan performa yang lebih baik secara keseluruhan. Penelitian [21] melakukan simulasi menggunakan *software Aspen Plus* untuk mengoptimasi siklus pembangkit tenaga uap dengan *feedwater heater* yang sudah ada. Gambar 8 menunjukkan siklus sebelum dan sesudah dilakukan optimasi.

Optimasi dilakukan dengan menambahkan *low pressure feedwater heater*, 2 unit *drain pump* dan *flue gas heat recovery (FGHR)*. Hasilnya terjadi peningkatan efisiensi keseluruhan pembangkit mencapai 0,7 poin. Penambahan *low pressure feedwater heater* untuk meningkatkan temperatur aliran fluida sebelum memasuki deaerator inlet. Adapun penambahan *drain pump* untuk langsung mengalirkan fluida dari *feedwater heater* menuju aliran utama kondensat, sehingga mengurangi beban kerja dan konsumsi listrik pompa kondenser.

Suatu pembangkit pada saat pertama dibuat dan dioperasikan tentu bekerja pada kondisi optimal. Namun seiring berjalannya



Gambar 9. Siklus pembangkit yang dijadikan studi kasus [22]



Gambar 10. Siklus dengan optimasi penambahan unit *feedwater heater* dan TVC [23]

waktu, kondisi optimal itu bergeser, sehingga perlu adanya optimasi ulang. Pada penelitian [22] dilakukan penyelidikan untuk mengoptimasi ulang pembangkit yang sudah cukup lama beroperasi, terutama pada bagian *feedwater heater*. Gambar 9 menunjukkan siklus pembangkit yang dijadikan studi kasus.

Dari penelitian tersebut diketahui bahwa, terdapat tekanan optimal dari uap hasil ekstraksi untuk *closed feedwater heater* yang mana memiliki efisiensi energi dan eksergi maksimal. Penambahan tekanan pada deaerator akan meningkatkan efisiensi termal dan eksergi pada siklus. Setiap pengurangan unit *feedwater heater* akan berujung pada penurunan efisiensi eksergi siklus.

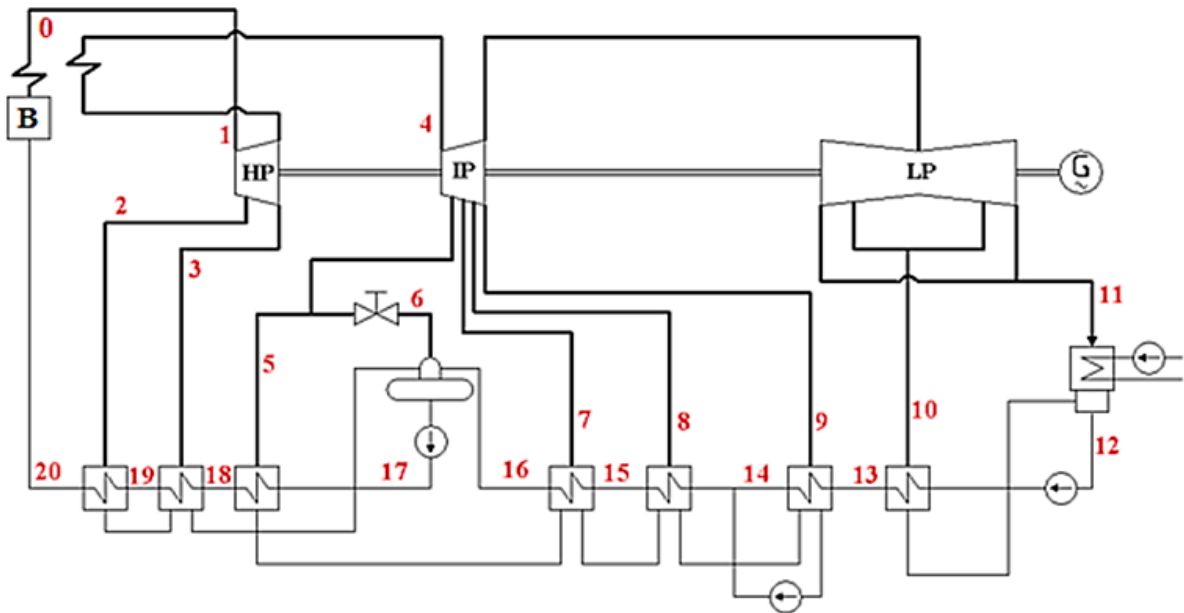
Pada saat pembangkit tenaga uap beroperasi pada beban parsial (*partial load*), maka aliran utama fluida kerja berkurang dan tekanan uap regeneratif menurun sehingga menyebabkan menurunnya temperatur pada *feedwater heater*. Akibatnya efisiensi termal siklus menjadi rendah. Optimasi sistem *feedwater heater* dapat dilakukan untuk mengatasi hal tersebut seperti yang disajikan pada penelitian [23]. Solusi yang ditawarkan yaitu dengan menambah unit *feedwater heater* dan *thermal vapor compressor (TVC/steam ejector)*, dapat dilihat pada Gambar 10.

TVC mengambil dan menginjeksikan sebagian aliran utama fluida kerja sebelum masuk turbin tingkat pertama, menuju unit *feedwater heater*. Oleh karenanya temperatur aliran fluida pada *feedwater heater* selanjutnya menjadi meningkat. Dengan rasio injeksi 0,5 dihasilkan peningkatan temperatur *feedwater heater* sebesar 20 °C.

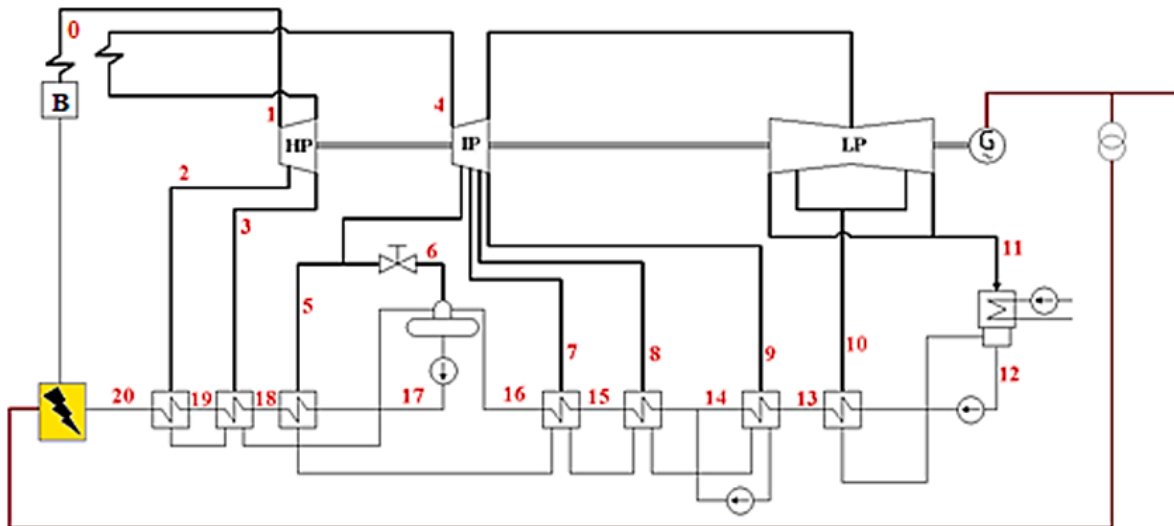
2.6 Kombinasi *Feedwater Heater* dengan Unit Lain

Pada masa transisi meninggalkan sumber energi konvensional menuju energi baru dan terbarukan, secara bertahap pembangkit tenaga uap dioperasikan dibawah beban kapasitasnya. Unit *feedwater heater* tidak dapat memberikan dampak maksimal apabila siklus pembangkit tenaga uap dioperasikan dibawah beban kapasitasnya, sehingga berujung pada penambahan kalor lebih besar pada boiler. Penelitian [24] melakukan suatu kombinasi pada sistem *feedwater heater* untuk menyelesaikan masalah tersebut dengan memperkenalkan *electric feedwater heater (EFH)*, dapat dilihat pada Gambar 11.

EFH berfungsi untuk memanaskan aliran fluida kerja sebelum memasuki boiler. EFH mendapatkan suplai listrik hasil dari generator sebelum disalurkan pada grid, sekaligus untuk memenuhi tuntutan generasi



(a)



(b)

Gambar 11. Siklus (a) sebelum penambahan EFH (b) setelah penambahan EFH [24]

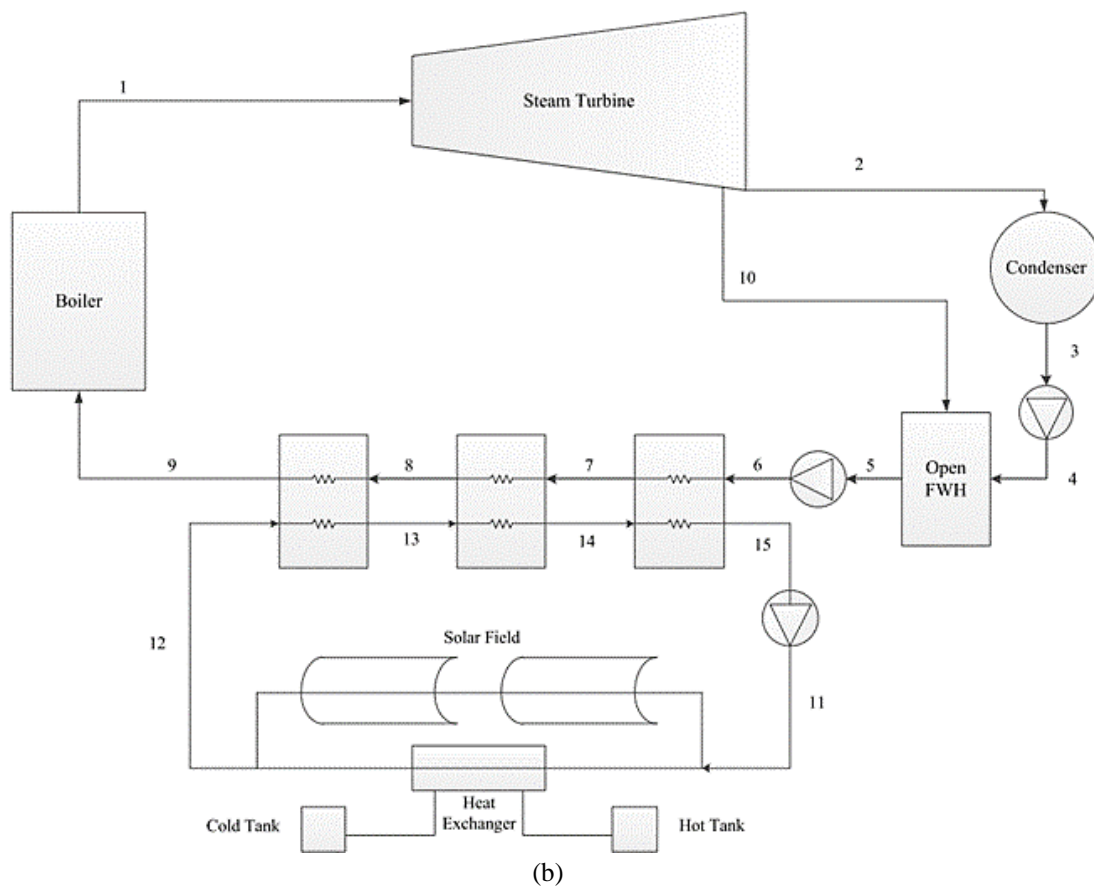
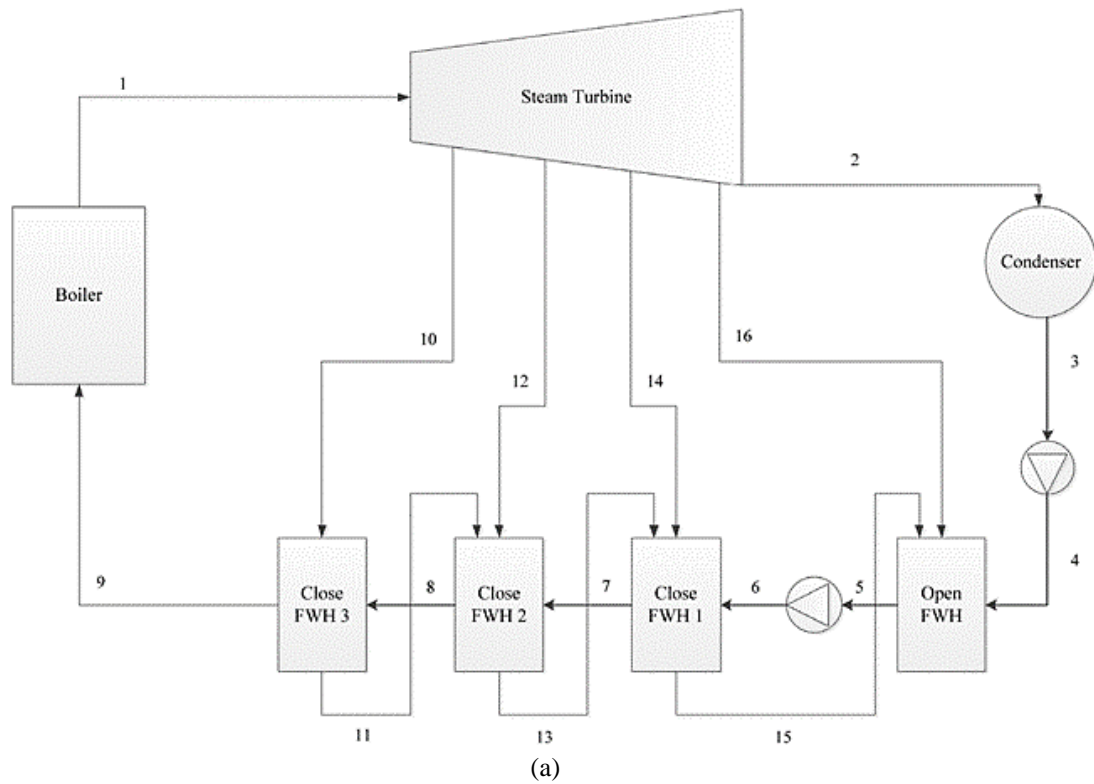
listrik yang lebih rendah daripada kapasitas pembangkit tenaga uap.

Dengan kata lain, daripada mengoperasikan pembangkit dibawah kapasitasnya untuk memenuhi tuntutan generasi listrik yang lebih rendah dari kapasitas pembangkit dan berakibat tidak optimalnya *feedwater heater* sehingga memerlukan penambahan kalor yang lebih besar pada boiler, lebih baik mengoperasikan pembangkit pada kapasitas normalnya dengan menambahkan unit EFH.

Kombinasi lainnya dari *feedwater heater* yaitu dengan *solar collector* sebagai

salah satu pemanfaatan energi terbarukan. Penelitian [25] menambahkan *solar collector* jenis *parabolic* sebagai unit pertukaran panas aliran fluida sebelum memasuki boiler. Siklus tersebut dapat dilihat pada Gambar 12.

Dengan mengkombinasikan *feedwater heater* dan *solar collector*, didapatkan peningkatan *net output power* sebesar 8,14%. Salah satu parameter yang perlu diperhatikan yaitu masih cukup besarnya luas area yang dibutuhkan *solar collector* pada siklus tersebut.



Gambar 12. Siklus pembangkit tenaga uap (a) tanpa *solar collector* (b) dengan *solar collector* [25]

3. Pengembangan Lebih Lanjut Feedwater Heater

Dari *review* literatur berbagai topik yang berkaitan dengan *feedwater heater* diatas, dapat memperlihatkan luasnya

cakupan yang bisa dijadikan penelitian dari *feedwater heater*. Adapun usulan-usulan yang dapat dilakukan sebagai kelanjutan dari penelitian-penelitian yang sudah ada disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Usulan penelitian selanjutnya

Penelitian Saat Ini	Usulan Penelitian selanjutnya
Topik 1. Penggunaan <i>feedwater heater</i>	
Membandingkan siklus dengan dan tanpa <i>feedwater heater</i> .	Membandingkan siklus dengan <i>open feedwater heater</i> dan siklus dengan <i>closed feedwater heater</i> terhadap efisiensi termal.
Topik 2. Jumlah <i>feedwater heater</i>	
Membandingkan jumlah unit <i>feedwater heater</i> hingga diketahui jumlah yang optimal.	Memetakan pengaruh jumlah <i>feedwater heater</i> dari mulai didapatkan peningkatan efisiensi termal yang signifikan, melandai, sampai apakah akan terjadi penurunan efisiensi termal.
Topik 3. Konfigurasi <i>feedwater heater</i>	
Membandingkan kombinasi konfigurasi <i>open feedwater heater</i> dan <i>closed feedwater heater</i> dengan masing-masing satu unit saja.	Mengetahui pengaruh kombinasi konfigurasi <i>open feedwater heater</i> dan <i>closed feedwater heater</i> dengan memasukan variabel perbandingan jumlah unitnya.
Topik 4. <i>Low and high feedwater heater</i> (LPH dan HPH)	
Membandingkan siklus tanpa LPH & HPH, siklus dengan LPH, serta siklus dengan LPH & HPH.	Menambahkan siklus dengan penggunaan <i>high pressure feedwater heater</i> (HPH) saja sebagai pembanding tambahan.

Topik 5. Optimasi <i>feedwater heater</i>	
Mengoptimasi <i>feedwater heater</i> pada suatu siklus pembangkit dengan menambahkan <i>low pressure feedwater heater</i> dan <i>drain pump</i> .	Membandingkan pengaruh dari penambahan beberapa komponen yang berbeda terhadap optimasi <i>feedwater heater</i> .

Topik 6. Kombinasi <i>feedwater heater</i> dengan unit lain	
Mengkombinasikan dari pemakaian <i>electric heater</i> dan <i>solar collector</i> dengan <i>feedwater heater</i> .	Mengkombinasikan dari pemakaian <i>feedwater heater</i> pada siklus pembangkit tenaga uap dengan unit lain, seperti <i>photovoltaic</i> , turbin angin ataupun unit pemanfaatan biomassa.

4. Kesimpulan

Penggunaan *feedwater heater* pada pembangkit tenaga uap dapat mengurangi penambahan kalor pada boiler sehingga pada akhirnya meningkatkan efisiensi termal siklus. Jumlah unit *feedwater heater* yang digunakan mempengaruhi besar peningkatan efisiensi yang didapatkan. Masing-masing siklus pembangkit tenaga uap memiliki jumlah unit *feedwater heater* tertentu yang dapat diketahui melalui simulasi *software*, sehingga bisa didapatkan besar peningkatan efisiensi termal yang optimal. Terdapat beberapa konfigurasi *feedwater heater* pada siklus pembangkit tenaga uap yang dapat diaplikasikan, mengingat ada dua jenis *feedwater heater* yaitu *open feedwater heater* dan *closed feedwater heater*.

Berdasarkan sumber ekstraksi turbin, baik tingkat pertama maupun kedua dan seterusnya, maka terdapat *high pressure feedwater heater* dan *low pressure feedwater heater*, yang mana masing-masing memiliki pengaruh yang berbeda. Upaya optimasi *feedwater heater* dapat

dilakukan dengan menambahkan komponen-komponen lain dengan tujuan akhir dapat meningkatkan temperatur aliran fluida sebelum memasuki boiler. *Feedwater heater* juga dapat dikombinasikan dengan *solar collector* sebagai upaya pemanfaatan energi terbarukan.

Referensi

- [1] O. J. Khaleel, T. K. Ibrahim, F. B. Ismail, and A. T. Al-Sammarraie, "Developing an analytical model to predict the energy and exergy based performances of a coal-fired thermal power plant," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 28, p. 101519, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.101519.
- [2] D. Wang, H. Li, C. Wang, Y. Zhou, X. Li, and M. Yang, "Thermodynamic analysis of coal-fired power plant based on the feedwater heater drainage-air preheating system," *Appl Therm Eng*, vol. 185, p. 116420, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116420.
- [3] J. Xu, T. Yang, Y. Sun, K. Zhou, and Y. Shi, "Research on varying condition characteristic of feedwater heater considering liquid level," *Appl Therm Eng*, vol. 67, no. 1–2, pp. 179–189, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.02.034.
- [4] T. Barszcz and P. Czop, "A feedwater heater model intended for model-based diagnostics of power plant installations," *Appl Therm Eng*, vol. 31, no. 8–9, pp. 1357–1367, Jun. 2011, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2010.12.012.
- [5] I. S. Hussaini, S. M. Zubair, and M. A. Antar, "Area allocation in multi-zone feedwater heaters," *Energy Convers Manag*, vol. 48, no. 2, pp. 568–575, Feb. 2007, doi: 10.1016/j.enconman.2006.06.003.
- [6] M. Wang, G. Liu, and C. W. Hui, "Novel shortcut optimization model for regenerative steam power plant," *Energy*, vol. 138, pp. 529–541, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.07.088.
- [7] M. A. Antar and S. M. Zubair, "The impact of fouling on performance evaluation of multi-zone feedwater heaters," *Appl Therm Eng*, vol. 27, no. 14–15, pp. 2505–2513, Oct. 2007, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2007.02.006.
- [8] B. A. Qureshi, M. A. Antar, and S. M. Zubair, "Heat exchanger inventory cost optimization for power cycles with one feedwater heater," *Energy Convers Manag*, vol. 86, pp. 379–387, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.05.028.
- [9] A. M. Abdel-Dayem and Y. M. Hawsawi, "Feasibility study using TRANSYS modelling of integrating solar heated feed water to a cogeneration steam power plant," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 39, p. 102396, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.csite.2022.102396.
- [10] S. O. Oyedepo, B. A. Fakeye, B. Mabinuori, P. O. Babalola, R. O. Leramo, O. Kilanko, J. O. Dirisu, M. Udo, U. K. Efemwenkikie, J. A. Oyebanji, "Thermodynamics analysis and performance optimization of a reheat – Regenerative steam turbine power plant with feed water heaters," *Fuel*, vol. 280, p. 118577, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.118577.
- [11] M. Á. Fernández, L. D. P. Valdés, and C. A. Tristán, "Thermal analysis of closed feedwater heaters in nuclear power plants," *Appl Therm Eng*, vol. 68, no. 1–2, pp. 45–58, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.04.006.
- [12] S. M. Hossienalipour, S. Karbalaee M., and H. Fathiannasab, "Development of a model to evaluate the water level impact on drain cooling in horizontal high pressure

- feedwater heaters,” *Appl Therm Eng*, vol. 110, pp. 590–600, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.08.203.
- [13] M. Imran, B. S. Park, H. J. Kim, D. H. Lee, M. Usman, and M. Heo, “Thermo-economic optimization of Regenerative Organic Rankine Cycle for waste heat recovery applications,” *Energy Convers Manag*, vol. 87, pp. 107–118, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.06.091.
- [14] H. Xi, M.-J. Li, C. Xu, and Y.-L. He, “Parametric optimization of regenerative organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery using genetic algorithm,” *Energy*, vol. 58, pp. 473–482, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.06.039.
- [15] S. O. Oyedepo, O. Kilanko, M. A. Waheed, O. S. I. Fayomi, O. S. Ohunakin, P. O. Babaloba, S. O. Ongbali, C. N. Nwaokocha, B. Mabinuori, O. O. Shopeju, “Dataset on thermodynamics performance analysis and optimization of a reheat – regenerative steam turbine power plant with feed water heaters,” *Data Brief*, vol. 32, p. 106086, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.dib.2020.106086.
- [16] T. Srinivas, A. V. S. S. K. S. Gupta, and B. V. Reddy, “Generalized Thermodynamic Analysis of Steam Power Cycles with ‘n’ Number of Feedwater Heaters,” *Int. J. of Thermodynamics*, vol. 10, no. 4, pp. 177–185, 2007.
- [17] Á. A. D. Pérez, J. C. E. Palacio, O. J. Venturini, A. M. M. Reyes, D. J. R. Orozco, E. E. S. Lora, O. A. A. D. Olmo, “Thermodynamic and economic evaluation of reheat and regeneration alternatives in cogeneration systems of the Brazilian sugarcane and alcohol sector,” *Energy*, vol. 152, pp. 247–262, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.03.106.
- [18] P. U. Akpan and W. F. Fuls, “Generic approach for estimating final feed water temperature and extraction pressures in pulverised coal power plants,” *Appl Therm Eng*, vol. 141, pp. 257–268, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.05.124.
- [19] S. Chantasiriwan, “Comparative thermo-economic analysis of regenerative Rankine cycles with two feed water heaters,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 28, p. 101476, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.101476.
- [20] S. N. Naserabad, A. Mehrpanahi, and G. Ahmadi, “Multi-objective optimization of feed-water heater arrangement options in a steam power plant repowering,” *J Clean Prod*, vol. 220, pp. 253–270, May 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.125.
- [21] S. Espatolero, L. M. Romeo, and C. Cortés, “Efficiency improvement strategies for the feedwater heaters network designing in supercritical coal-fired power plants,” *Appl Therm Eng*, vol. 73, no. 1, pp. 449–460, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.08.011.
- [22] O. J. Khaleel, T. K. Ibrahim, F. B. Ismail, A. T. Al-Sammarraie, and S. H. bin A. Hassan, “Modeling and analysis of optimal performance of a coal-fired power plant based on exergy evaluation,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 2179–2199, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.01.072.
- [23] L. Jiping, H. Wei, W. Xin, H. Xiaoqu, C. Daotong, and Y. Junjie, “Theoretical Investigation on the Partial Load Feedwater Heating System with Thermal Vapor Compressor in a Coal-fired Power Unit,” *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 1102–1107, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.500.
- [24] C. Polski, T. Polski, J. Roman, R. Wróblewski, J. Bartoszewicz, and B.

Ceran, "A novel concept to improve the flexibility of steam power plants using an electric feedwater heater," *Appl Therm Eng*, vol. 236, p. 121661, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121661.

- [25] A. Mohammadi, M. H. Ahmadi, M. Bidi, M. Ghazvini, and T. Ming, "Exergy and economic analyses of replacing feedwater heaters in a Rankine cycle with parabolic trough collectors," *Energy Reports*, vol. 4, pp. 243–251, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.egy.2018.03.001.