

Desain Pembangkit Listrik Turbin Uap Berbahan Bakar Batu Bara yang Efektif dan Ramah Lingkungan

DADANG MULYADI¹, DANI RUSIRAWAN², NOVRITA I³

¹Pusat Riset Elektronika-BRIN, Indonesia

²Teknik Mesin-Institut Teknologi Nasional, Indonesia

³Pusat Riset Elektronika-BRIN, Indonesia

Email: dangmulyadi01@gmail.com

ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu sumber pembangkit listrik yang banyak digunakan di berbagai negara karena memiliki beberapa keunggulan diantaranya-Nya; teknologi sudah dikuasai, bahan bakar murah, dan usia pakai yang lama. Prinsip kerja PLTU adalah mengandalkan energi kinetik dari uap untuk menghasilkan energi listrik yang menggunakan generator untuk memutar turbin. Pembangkit ini menggunakan bahan bakar batu bara maupun bahan bakar minyak untuk memanaskan air. Penggunaan bahan bakar batu bara hingga saat ini masih menjadi andalan di Indonesia karena sumber yang tersedia banyak dan harga yang murah. Akan tetapi, penggunaan batu bara dapat menyebabkan pencemaran gas CO₂ yang membahayakan lingkungan dan kesehatan. Untuk itu, desain dan karakteristik turbin uap yang baik, sangat diperlukan agar dapat menghasilkan pembakaran yang efektif dan optimal dengan emisi gas CO₂ yang rendah. Dalam *review paper* ini disampaikan berbagai hasil penelitian yang menunjukkan desain turbin uap yang inovatif, efisien, dan ramah lingkungan dalam menghasilkan energi listrik.

Kata kunci: Turbin uap, pembangkit listrik, batu bara, generator, turbin

ABSTRACT

Steam Power Plant (PLTU) is a source of electricity that is widely used in various countries because it has several advantages including technology that has been mature, cheap fuel, and long lifetime. The working principle of the PLTU is to rely on the kinetic energy of steam to produce electrical energy that uses a generator to rotate the turbine. This power plant uses coal or oil as fuel to heat water. The use of coal as fuel is still a mainstay in Indonesia because of the available sources and low prices. However, the use of coal can cause CO₂ gas pollution which is harmful to the environment and health. For this reason, the design and characteristics of a good steam turbine are needed in order to produce an effective and optimal combustion with low CO₂ emissions. In this review paper, various research results are presented showing that steam turbine designs are innovative, efficient, and environmentally friendly in generating electricity power.

Keywords: Steam turbine, power plant, coal, generator, turbine

1. PENDAHULUAN

Dalam aktivitas kehidupan sehari-hari, listrik adalah merupakan salah satu kebutuhan pokok manusia modern yang harus tersedia. Melalui perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi kebutuhan tersebut dapat dipenuhi, salah satunya melalui pembangkit listrik.

Pembangkit listrik dibangun dan dioperasikan untuk menghasilkan listrik sehingga dapat disuplai ke rumah-rumah penduduk. Cukup banyak jenis pembangkit listrik yang diciptakan dan digunakan saat ini, seperti Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTB), Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), Pembangkit Listrik Tenaga Ombak (PLTO), dan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Pembangkit listrik PLTU banyak dipakai dan digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik penduduk di seluruh negara.

Komponen yang digunakan pada PLTU adalah turbin uap, dimana turbin uap telah menjadi komponen yang sangat penting dalam keberadaan pembangkit listrik. Tanpa turbin uap, sulit untuk bisa mendapatkan daya listrik yang diinginkan. Fungsi turbin uap adalah untuk mengonversi energi panas yang dikandung oleh uap menjadi energi putar (energi mekanik). Poros turbin dihubungkan dengan poros generator sehingga ketika turbin berputar, generator juga ikut berputar. **(Liheng, dkk, 2022)** Pada dasarnya prinsip kerja turbin uap adalah penggerak awal yang berguna untuk mengubah energi potensial yang ada menjadi energi kinetik. Energi kinetik ini kemudian diubah menjadi energi mekanik yang terbentuk pada putaran poros turbin. Selanjutnya poros turbin dihubungkan dengan mekanisme yang digerakkan, bisa langsung atau dengan bantuan elemen lainnya sehingga menghasilkan energi listrik. Dengan mekanisme kerja yang demikian akhirnya turbin uap dapat berguna menjadi pembangkit listrik.

Secara sederhana, turbin uap bekerja dengan menggunakan sumber panas yang berasal dari gas, batu bara, nuklir, dan matahari untuk memanaskan air sampai suhu yang sangat tinggi hingga diubah menjadi uap. Saat uap mengalir melewati bilah turbin yang berputar, uap mengembang dan mendingin. Energi potensial uap diubah menjadi energi kinetik di bilah turbin yang berputar. Karena turbin uap menghasilkan gerakan berputar, mereka sangat cocok untuk menggerakkan generator listrik untuk pembangkit tenaga listrik. **(Heng, dkk, 2020)**

Sekitar 36,4% pembangkit listrik tenaga uap di dunia menggunakan batu bara sebagai energi panas. Banyak negara berusaha mengurangi ketergantungan mereka pada pembangkit listrik tenaga batu bara dengan menggantinya dengan energi terbarukan. Energi matahari semakin mendapat perhatian dengan berkembangnya teknologi tenaga surya. Namun, pembangkit listrik tenaga surya tradisional masih membutuhkan biaya investasi yang tinggi dan efisiensi masih rendah. **(Cheng, dkk, 2020)** Untuk itu, turbin uap dengan bahan bakar batu bara masih dianggap paling potensial dalam menghasilkan energi listrik. Desain dan rancangan turbin uap terus ditingkatkan oleh para pakar agar menghasilkan desain turbin uap berbahan bakar batu bara yang dapat menghasilkan energi listrik dengan optimal dengan sedikit emisi gas buang CO₂.

Jenis pembangkit uap yang diperlukan untuk menghasilkan listrik sangatlah kompleks, dirancang sedemikian rupa sehingga setiap bit panas yang dapat digunakan yang dihasilkan oleh pembakaran batu bara diubah menjadi kerja mekanis di turbin uap. Jika pabrik menggunakan jenis batu bara sebagai bahan bakar, aliran udara dan pembakaran tungku perlu diubah untuk mencegah panas berlebih. Secara kompleks, semua komponen suhu tinggi harus didorong sekuat mungkin agar menghasilkan energi listrik yang maksimal. **(Jianlan, dkk, 2021)** Siklus pemanasan ulang tunggal telah banyak dipakai pada pembangkit listrik

berbahan bakar batu bara untuk meningkatkan efisiensi turbin karena mengurangi kebasahan uap buangan dari turbin tekanan rendah. Namun, untuk unit superkritis atau unit ultra superkritis, siklus pemanasan ulang tunggal terbatas dan siklus pemanasan ulang ganda dapat memperoleh efisiensi yang lebih tinggi. Efisiensi turbin dengan pemanasan ulang ganda secara teoritis 1.0 s/d 2.0% lebih tinggi dibandingkan dengan pemanasan ulang tunggal. **(Wenfeng, dkk, 2021)** Li dkk. memperkenalkan surya *reheater* untuk memanaskan IP *exhaust steam* ke 538 °C untuk 300 MW berbahan bakar batu bara, dan menemukan bahwa tingkat konsumsi batu bara standar SACP sistem dalam mode PB dan FS dapat dikurangi sebesar 35,98 dan 34,99 g/ kWh. Namun, mereka fokus pada efisiensi termal tetapi mengabaikan batas suhu tahan panas dari turbin LP. Suhu layanan material maksimum LP umumnya tidak lebih dari 400^o C untuk unit berbahan bakar batu bara 300 MW. **(Jianlan, dkk, 2021)**

Banyak teknologi telah diusulkan untuk meningkatkan fleksibilitas turbin berbahan bakar batu bara. Teknologi semacam itu terutama dibagi menjadi dua kategori. Yang pertama mencapai unit tenaga termal dengan menambahkan tautan penyimpanan energi. Kategori kedua, digunakan untuk meningkatkan fleksibilitas keseluruhan unit berbahan bakar batu bara dengan memanfaatkan karakteristik penyimpanan energi mereka sendiri. **(Cheng, dkk, 2020)**

Turbin uap terdiri dari beberapa komponen yang masing-masing berguna untuk memberikan performa yang baik terhadap kinerja mesin. Masing-masing komponen tersebut secara bersama-sama menghasilkan uap dalam jumlah yang tepat sehingga dapat menghasilkan energi listrik yang optimal. Ada tujuh komponen turbin uap, yaitu; 1) *casing*, sebagai penutup utama dari bagian-bagian dalam turbin uap. Dengan adanya *casing*, komponen turbin uap tidak langsung terekspos dari luar sehingga tetap awet; 2) *rotor*, bagian dari turbin yang berputar dan jumlahnya cukup banyak. Terdapat dua bagian rotor pada turbin uap, yaitu *rotor shaft* (berfungsi sebagai komponen untuk pemasangan piringan sepanjang sumbu) dan *rotor blades* (berfungsi sebagai penerima gaya energi kinetik uap); 3) cakram, berfungsi sebagai tempat dipasangnya sudu-sudu secara radial di antara poros-poros; 4) *nozel*, media pemuai uap yang nantinya dapat mengubah energi potensial yang ada menjadi energi kinetik; 5) *bearing*, berfungsi untuk menyangga kedua ujung poros dan juga bermanfaat sebagai penerima beban yang ditimbulkan; 6) *seal*, berfungsi untuk mencegah hal-hal yang tidak diinginkan seperti kebocoran uap. Biasanya, segel dipasang di sekitar poros; 7) *clutch*, berfungsi sebagai penghubung antara kerja turbin uap dengan mekanisme yang digerakkan oleh turbin uap.

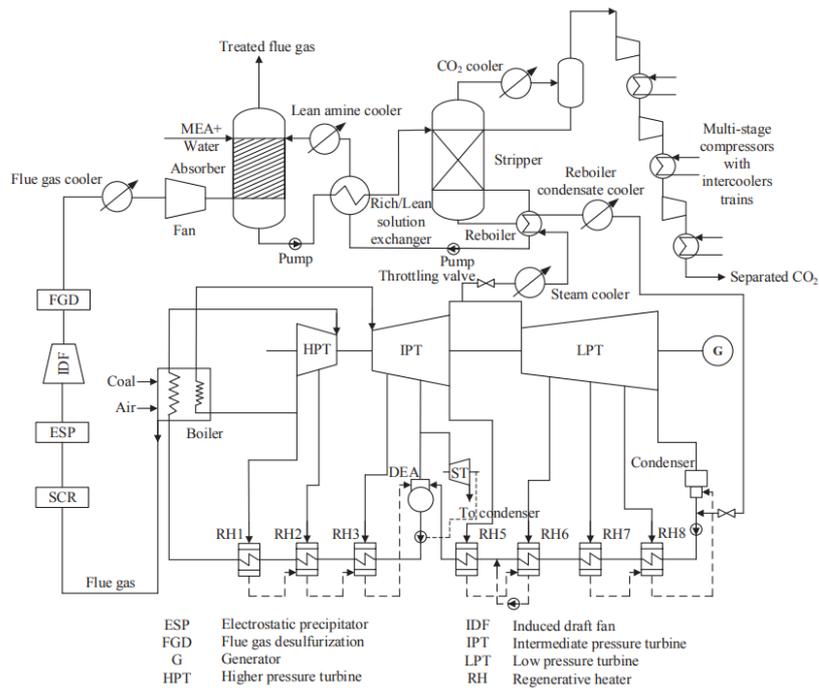
Cukup banyak komponen yang ada pada turbin uap, namun turbin uap tetap menjadi kebutuhan utama di industri saat ini. Oleh sebab itu, metode, desain dan perancangan turbin uap yang efektif dan optimal sangat diperlukan. Pada makalah ini, akan disampaikan jenis-jenis metode, desain turbin uap yang menggunakan sumber bahan bakar batu bara dengan desain yang efektif dapat mengurangi pencemaran kandungan CO₂ hasil pembakaran dan menghasilkan energi listrik yang optimal.

2. DESAIN TURBIN UAP BERBAHAN BAKAR BATU BARA

Teknologi yang digunakan untuk meningkatkan fungsi turbin uap berbahan bakar batu bara dengan mengurangi pembakaran yang menghasilkan emisi CO₂ dilakukan dengan berbagai metode seperti dekarbonisasi, termodinamika, siklus termodinamika, efisiensi pembakaran gas buang dll.

2.1 Dekarbonisasi Superkritikal

Cheng Xu mengusulkan metode dekarbonisasi superkritikal dengan modifikasi *supplementary steam turbine (SST)*, *process heat recovery* dan konfigurasi penukar pemanas pada boiler. Bagian dari proses panas di dalam unit penangkap/kompresi CO₂ diperoleh kembali secara efisien dan menguntungkan yang digunakan untuk memanaskan udara sekitar sebelum memasuki pemanas udara awal. Gas buang yang disimpan dapat digunakan untuk memanaskan uap air dalam *economizer* suhu rendah (LTE), sehingga dapat menghemat sebagian uap yang keluar dari turbin. Hasil menunjukkan bahwa efisiensi energi dari sistem yang diusulkan dapat menurun emisi sebesar 3,86%. Skema diagram pembangkit listrik batu bara berdasarkan metoda de-karbonisasi dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema diagram pembangkit listrik batu bara berdasarkan metoda de-karbonisasi (Cheng, dkk, 2020)

Diagram gambar 1 menunjukkan skema pembangkit listrik berbahan bakar batu bara berdasarkan dekarbonisasi *monoethanolamine* (MEA) konvensional 1000 MW, yang terdiri dari pembangkit listrik induk dan unit penangkap/kompresi CO₂. Dengan kata lain, pembangkit listrik induk tidak dilengkapi dengan unit penangkap/kompresi CO₂. Pembangkit referensi adalah pembangkit yang dilengkapi dengan unit penangkapan/kompresi CO₂ dan menggunakan parameter termodinamika yang sama dengan pembangkit induk. Perlu dicatat bahwa, untuk menjamin parameter steam yang sama (tekanan dan suhu *steam bleed*) dengan pembangkit listrik induk, ukuran turbin suhu rendah di pembangkit dikurangi.

Parameter pembangkit listrik induk dan unit penangkapan/kompresi CO₂ sama dengan yang diadopsi. Pembangkit listrik menghasilkan *live steam* pada 600 °C, 26,25 MPa dan *reheat steam* pada 600 °C, 5,65 MPa dengan proses pemanasan ulang tunggal. Regeneratif delapan tahap pemanas digunakan dan uap diekstraksi dari HPT, IPT dan LPT untuk pra-pemanasan air yang terkondensasi/umpan. Laju aliran massa keseluruhan dari aliran uap akan berubah setelah menerapkan proses penangkapan CO₂. Di dalam unit penangkap/kompresi CO₂, semua

gas buang keluar unit desulfurisasi didinginkan dalam pendingin gas buang hingga 40 °C dan kemudian dikompresi oleh kipas *booster* untuk mengatasi penurunan tekanan dalam kolom penyerap. Gas buang terkompresi memasuki bagian bawah kolom penyerap dan bereaksi dengan 30% berat larutan MEA, yaitu disuntikkan dari atas *absorber*. Gas buang yang diolah, mengandung N₂, H₂O, dan O₂, langsung dibuang ke atmosfer. Setelah menyerap CO₂, larutan yang mengandung amina dialirkan ke penukar panas. Energi regenerasi yang dibutuhkan untuk disediakan oleh uap dari pipa penghubung antara IPT dan LPT. *Steam bleed* pertamanya dikurangi tekanannya dan didinginkan hingga 130 °C sebelum memasuki *reboiler*. Di *outlet reboiler*, udara (disebut sebagai kondensat *reboiler*) didinginkan ke 65 °C kemudian dialirkan ke kondensator. CO₂ didesorpsi di *stripper* dan larutan amina dikirim ke penukar panas untuk mentransfer panas dengan larutan yang mengandung amina, dan kemudian suhu sekitar 60 °C didinginkan hingga 40 °C dan dikembalikan ke *absorber*. Aliran CO₂ keluar di bagian atas adalah sekitar 100 °C dan kemudian didinginkan dalam pendingin CO₂ hingga 40 °C untuk menghilangkan kelembapan. Setelah itu, Aliran CO₂ dikompresi dan didinginkan dalam kompresor tiga tahap dengan *intercooler* untuk mencapai parameter 8,0 MPa/38 °C untuk penyimpanan. Pada setiap tahap kompresor, CO₂ dikompres dengan rasio kompresi pada 3,5 terhadap suhu sekitar 158 °C dan didinginkan hingga 38 °C sebelum memasuki kompresor berikutnya. Jumlah energi yang besar diperlukan untuk menangkap CO₂/unit kompresi dan beberapa bentuk kehilangan energi (panas dan tekanan) diproduksi secara sinergis. Kehilangan tekanan uap yang besar dari 0,66 MPa menjadi 0,27 MPa di katup *throttling* di saluran masuk *reboiler* juga terjadi. Sebagai untuk kerugian kerja, hampir setengah dari uap antara pipa IPT dan LPT diekstrak, menghasilkan pengurangan hasil kerja di LPT. Berdasarkan parameter rinci dan kinerja termodinamika, pembangkit listrik yang menggabungkan unit penangkap CO₂ dapat dicapai menggunakan simulasi proses.

Skema diagram tersebut yang menggunakan metoda dekarbonisasi superkritis dengan menggabungkan turbin uap tambahan, sisa proses pemanasan, dan modifikasi desain boiler menghasilkan keunggulan seperti;

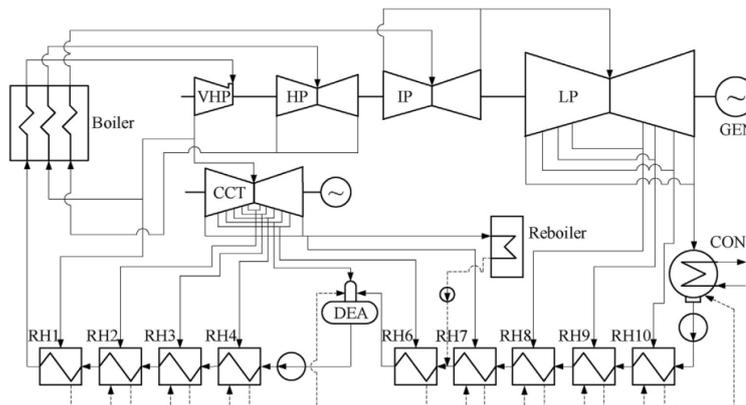
- Integrasi desain turbin uap dapat memberikan aliran uap yang lebih cocok untuk ketel ulang di dalam unit penangkap CO₂ dan pemanas air secara *regenerative* pemanas 3–5, menghilangkan kehilangan panas pendingin pembuangan uap (95,5 MWth) dan kehilangan tekanan (0,39 MPa), secara bersamaan juga mengurangi emisi karbon.
- Pendingin CO₂ dan *intercooler* kompresi tiga tahap dalam unit kompresi CO₂ dapat memanaskan udara sekitar hingga 129,9 °C sebelum memasuki *preheater* udara, sehingga menghemat 359 kg/s gas buang untuk memanaskan umpan/air kondensasi pada suhu rendah, yang menurunkan ekstraksi uap untuk sistem regeneratif sebesar 3,4%.
- Konsep ini dapat meningkatkan keluaran daya listrik bruto sebesar 92,8 MW setelah mempertimbangkan konsumsi listrik di kompresi CO₂ (91,9 MW) dan pompa air umpan (43,5 MW) dan menurunkan konsumsi energi sebesar 3,86%.
- Biaya listrik dan biaya gas emisi CO₂ berkurang 9,5% dan 27,7%.

Desain metode ini menunjukkan konsep termodinamika yang tepat pada variasi yang luas dari pembangkit listrik.

2.2 Penangkapan Gas CO₂ pasca-pembakaran

Wenfeng Fu telah merancang sistem termal pada *double reheat* pembangkit listrik tenaga batu bara yang terintegrasi dengan *full-scale* penangkapan CO₂ pasca-pembakaran. Melalui metode ini, konsumsi batu bara dan tingkat emisi CO₂ berkurang karena *full-scale* penangkapan CO₂ secara efisien mencegah ekstraksi *superheat* uap dan ketidaksesuaian antara tekanan silinder knalpot dan *reboiler* dari menghasilkan kerugian energi yang berlebihan. Sistem integrasi yang

baik dibuat seperti pada Gambar 2 yaitu suatu diagram untuk peningkatan sistem penangkapan CO₂ berbahan bakar batu bara *double reheat* yang terdiri dari beberapa skema integrasi yang memiliki beberapa karakteristik. Pertama, skema baru yang mengusulkan turbin tekanan balik ekstraksi yang disebut *carbon capture turbine* (CCT) bersama dengan turbin utama sehingga membentuk sistem pembangkit listrik *double-shaft*. Kedua, uap ekstraksi yang mengalir dari *high pressure cylinder* (HP) dan (IP) ke sistem regeneratif digantikan oleh uap yang diekstrak oleh CCT. Ketiga, tekanan uap buang dan suhu CCT memenuhi kebutuhan *reboiler* untuk penyerap regenerasi. Keempat, *drain reboiler* mengalir kembali ke outlet pemanas regeneratif yang sumber uapnya berasal dari knalpot CCT.

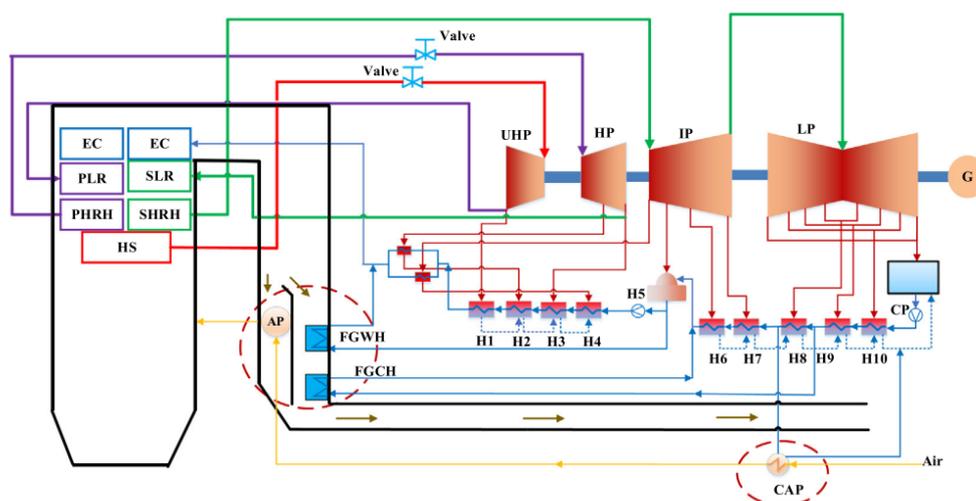


Gambar 2. Skema diagram peningkatan integrasi sistem penangkapan CO₂ berbahan bakar batu bara *double reheat* (Wenfeng, dkk, 2021)

Bila dibandingkan dengan unit retrofit konvensional, efisiensi sistem termal dan optimalisasi beberapa parameter meningkat sebesar 1,22%. Selain itu, konsumsi batu bara berkurang sebesar 0,01264 kg/(kW\$h) dan tingkat emisi CO₂ menjadi 0,00423 kg/(kW\$h). Metode analisis eksergi adalah diterapkan untuk memvalidasi dan mengidentifikasi efisiensi keunggulan desain unit termal yang baru dirancang. *Boiler*, sistem regeneratif, dan karbon sistem penangkapan di unit yang baru dirancang menunjukkan berbagai tingkat pengurangan kerugian energi, yang mengungkapkan penghematan energi yang sangat baik dari skema ini. Efisiensi CCT hampir sama tingginya dengan efisiensi utama turbin karena kapasitasnya yang cukup besar dan penurunan entalpi. CCT juga dapat mencegah ekstraksi *steam superheat* dan ketidakcocokan antara silinder tekanan menengah knalpot dan *reboiler* dari kerugian yang berlebihan secara efisien. Di dalam kasus ini, CCT dapat memberikan desain yang sangat masuk akal untuk pemanasan ulang ganda unit pembangkit berbahan bakar batu bara yang terintegrasi dengan PCC.

2.3 Analisis kinerja sistem pemanfaatan limbah panas yang efisien di pembangkit listrik tenaga batu bara ultra-superkritik

Mei Y menganalisis kinerja sistem pembangkit tenaga uap dengan metode memanfaatkan limbah panas secara efisien dan efektif pada pembangkit listrik tenaga batu bara ultra-superkritik yang dapat pengurangan emisi untuk pembangkit listrik tenaga batu bara sehingga dapat berkontribusi untuk mencapai tujuan netralitas pencemaran gas karbon.



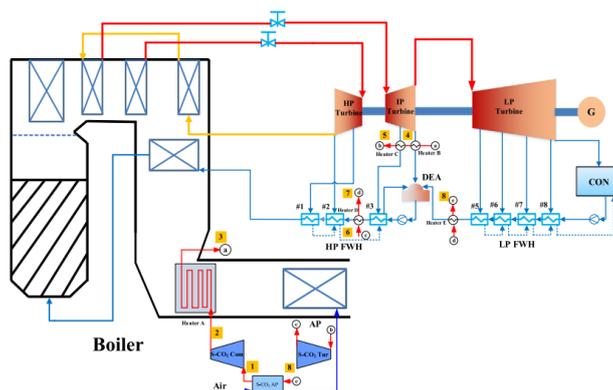
Gambar 3. Skema diagram pemanfaatan limbah panas (Mei, 2022)

Dengan munculnya sumber energi baru di industri listrik, meningkatkan efisiensi berbahan bakar batu bara pembangkit listrik sangat penting. Saat ini, penyebab utama hilangnya energi ireversibel adalah energi tingkat ketidakcocokan *boiler* dan turbin. Termodinamika pembangkit listrik berbahan bakar batu bara ultra-superkritik sistem direkonstruksi berdasarkan hukum termodinamika pertama dan kedua untuk meningkatkan efisiensi pembangkit listrik, dan cerobong terintegrasi udara pemanasan awal air kondensat yang efisien. Sistem pemanfaatan pemanas limbah yang efisien dengan demikian diusulkan di sini. Akibatnya, tinggi dan sedang aliran ekstraksi turbin uap dikembalikan ke turbin uap untuk melakukan kerja dan kehilangan sumber dingin dikurangi dengan meningkatkan aliran uap ekstraksi dari silinder bertekanan rendah. Pada waktu bersamaan, suhu udara masuk di *preheater* udara meningkat secara signifikan dengan memanaskan udara panas terlebih dahulu dengan air kondensat, menghasilkan perbedaan suhu perpindahan panas yang berkurang dan signifikan meningkatkan efisiensi eksergi. Dibandingkan dengan *economizer* suhu rendah konvensional dan cerobong asap skema pemanfaatan limbah panas, hasil menunjukkan bahwa efisiensi eksergi perpindahan panas meningkat secara signifikan dari 78,49% menjadi 95,88% di *preheater* udara, dan tingkat konsumsi panas turbin genset turun sebesar 108,06 kJ/(kWh). Efisiensi pembangkitan meningkat sebesar 0,74%, sedangkan tingkat konsumsi batu bara standar menurun sebesar 3,92 g/(kWh). Dalam hal investasi ekonomi, periode pengembalian dinamis adalah 3,31 tahun dan nilai sekarang bersih adalah \$2,20 juta/tahun.

Makalah ini menyediakan konservasi energi yang efektif dan rencana pengurangan emisi untuk pembangkit listrik tenaga batu bara untuk berkontribusi untuk mencapai tujuan puncak karbon nasional dan netralitas karbon

2.4 Sistem termodinamika pada turbin uap berdasarkan siklus S-CO₂

Lihua C. (07 2022), melakukan analisa energi termodinamika siklus S-CO₂ pada boiler uap yang hasilnya menunjukkan bahwa kondisi penerimaan panas turbin (THA), sistem termal yang diusulkan dapat mengurangi tingkat konsumsi batu bara standar sebesar 0,91% pada unit pembangkit listrik berbahan bakar batu bara sehingga emisi CO₂ juga berkurang.



Gambar 4. Skema diagram desain sistem termodinamika (Lihua, dkk, 2022)

Pada metoda ini, konfigurasi sistem siklus S-CO₂ tambahan untuk unit pembangkit berbahan bakar batu bara. Sistem ini mencapai pemanfaatan kaskade ekstraksi turbin uap dan gas buang boiler energi, untuk meningkatkan efisiensi pembangkitan unit tenaga batu bara. Analisis termodinamika adalah dilakukan untuk sistem termal baru berdasarkan analisis energi dan eksergi. Hasilnya menunjukkan bahwa di bawah kondisi penerimaan panas turbin (THA), sistem termal yang diusulkan dapat mengurangi tingkat konsumsi batu bara standar sebesar 0,91% pada unit pembangkit listrik berbahan bakar batu bara. Selanjutnya faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja sistem dianalisis, dan hukum efek dari berbagai elemen pada total investasi dan periode pengembalian diturunkan. Sistem termodinamika yang disarankan menyediakan metode untuk digunakan energi di kedua sisi *boiler* dan turbin uap.

Sebuah sistem termodinamika unit berbahan bakar batu bara dibangun berdasarkan siklus S-CO₂ untuk meningkatkan efisiensi operasi Gambar 4. Pengaruh tekanan keluar kompresor S-CO₂ terhadap kinerja *system* unit pembangkit listrik berbahan bakar batu bara. Di bawah kondisi kerja THA, analisis termodinamika dilakukan, dan faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja sistem dan hukum perubahan teknis dan indeks ekonomi dipelajari. Kesimpulan yang berikut diperoleh adalah sbb:

(1) Sistem siklus S-CO₂ tambahan mencapai pemanfaatan gas buang, udara, uap, air, dan energi yang komprehensif unit pembangkit listrik berbahan bakar batu bara dan mengurangi standar tingkat konsumsi batu bara unit sebesar 0,91%. Siklus tambahan mengurangi kehilangan eksergi pertukaran panas dengan mengubah perbedaan suhu pertukaran panas dari fluida kerja yang berbeda. Untuk sistem siklus tambahan, kerugian eksergi gas buang-S-CO₂ pertukaran panas dan pertukaran panas S-CO₂ udara *relative* besar, terhitung masing-masing 66,35% dan 15,91%.

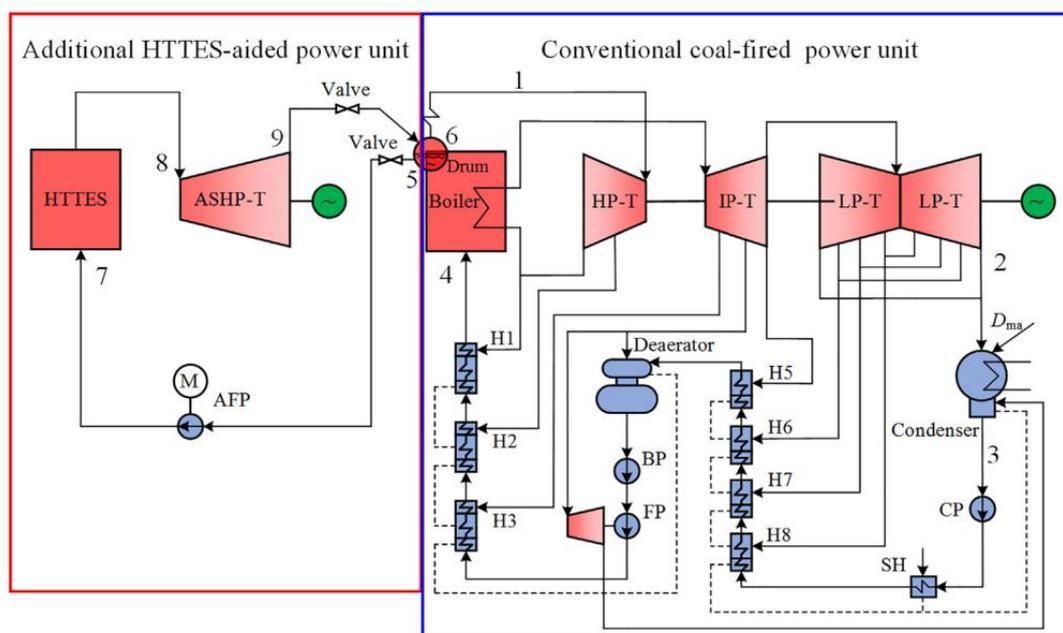
(2) Meningkatkan laju alir S-CO₂ antara 60 kg/s dan 90 kg/s dapat meningkatkan beban pembangkit listrik dari sistem siklus S-CO₂ sekitar 4,8 MW–6,8 MW. Antara 60 kg/s dan 90 kg/s, dengan peningkatan laju aliran S-CO₂, total investasi sistem meningkat dari \$3.6 M menjadi \$5.5 M, dan siklus pemulihan statis meningkat dari 5,2 menjadi 6,8 tahun.

(3) Tekanan masuk dan keluar kompresor sedikit berdampak pada distribusi beban dan ekonomi yang diusulkan sistem. Ketika efisiensi kompresor/turbin didistribusikan dalam kisaran 70%–90%, total beban unit meningkat dengan peningkatan efisiensi. Ketika efisiensi kompresor/turbin meningkat sebesar 5%, beban pembangkit listrik unit meningkat sebesar 0,0636% P0. Ketika efisiensi kompresor/turbin adalah antara 70%–85%, dampaknya pada

investasi peralatan dan periode pengembaliannya tidak jelas. Ketika efisiensi kompresor/turbin mencapai 90%, total investasi sistem dan periode pengembalian meningkat secara signifikan.

2.5 Peningkatan fleksibilitas beban pembangkit listrik tenaga batu bara dengan mengintegrasikan penyimpanan energi termal suhu tinggi melalui siklus termodinamika

Ruifeng C menyajikan pendekatan baru untuk meningkatkan fleksibilitas beban pembangkit listrik tenaga batu bara dengan mengintegrasikan penyimpanan energi panas suhu tinggi (HTTES) melalui siklus termodinamika tambahan. Hal ini bertujuan untuk menyelidiki kelayakan siklus tambahan yang dibantu HTTES ke dalam siklus uap-air pembangkit listrik tenaga batu bara konvensional dan untuk menguji bagaimana efisiensi bolak-balik yang tinggi dapat dicapai dengan HTTES.



Gambar 5. Diagram sistem termal pembangkit listrik tenaga batu bara *high temperature thermal energy storage* (HTTES) (Ruifeng dkk, 2020)

3. PENGGUNAAN TURBIN UAP BERBAHAN BAKAR BATU BARA DIMASA DEPAN

Indonesia mempunyai banyak sumber energi seperti : batu bara, gas alam, minyak bumi, energi air, dan *geothermal*. Batu bara merupakan sumber energi dengan cadangan terbesar, yaitu 36,34 x 106 ton. Sedangkan cadangan gas alam sebesar 137,79 TSCF (*Tera Standard Cubic Feet*) dan minyak bumi sebesar 9,09 x 109 SBM (Setara Barel Minyak).

Oleh sebab itu, batu bara diperkirakan paling dominan digunakan sebagai bahan bakar untuk pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) di Indonesia di masa datang, walaupun penggunaan batu bara dalam jumlah yang besar akan meningkatkan emisi seperti emisi partikel, SO_2 , NO_x , dan CO_2 . Salah satu cara untuk mengurangi emisi adalah dengan menerapkan teknologi dalam mendesain turbin uap yang efektif dan efisien.

Aplikasi lain dari turbin uap yang lebih modern dimasa mendatang dapat digunakan pada kendaraan. Beberapa alasan mengapa turbin uap modern memiliki potensi besar untuk kendaraan masa depan adalah:

1. Sumber energi bisa fleksibel, selain batu bara juga dapat menggunakan matahari, listrik dan *biofuel*.
2. Dapat didesain secara *hybrid* dengan *ICE*, *electric propulsion* dan *fuel cells*.
3. Tingkat pencemaran rendah.
4. Dapat digabungkan dengan baterai termal.
5. Pengereman mesin regeneratif
6. Energi efisien.
7. Murah.

4. KESIMPULAN

Desain dan karakteristik turbin uap yang baik, sangat diperlukan agar dapat menghasilkan pembakaran yang efektif dan optimal dengan emisi gas CO₂ yang rendah. Dalam review paper ini disampaikan berbagai hasil penelitian yang menunjukkan desain turbin uap yang inovatif, efisien, dan ramah lingkungan dalam menghasilkan energi listrik dengan berbagai metoda seperti dekarbonisasi, termodinamika, siklus termodinamika, efisiensi pembakaran gas buang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih Ketua Jurusan Mesin Institut Teknologi Nasional dan Pusat Riset Elektronika Badan Riset dan Inovasi Nasional yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk melanjutkan studi dan menambah ilmu serta dapat membuat *review paper* khususnya dalam bidang energi pembangkit listrik.

DAFTAR RUJUKAN

- Liheng, G., & Yudong D. (2022). A new heat supply strategy for CO₂ capture process based on the heat recovery from turbine exhaust steam in a coal-fired power plant. *Elsevier, Energy, 239*12181.
- Jianlan, Li., & Yu, X. (2021). Safety and thermal efficiency performance assessment of solar aided coal-fired power plant based on turbine steam double reheat. *Elsevier, Energy 226*, 120277.
- Cheng, X., & Xiaosa L. (2020). An integrated de-carbonization supercritical coal-fired power plant incorporating a supplementary steam turbine, process heat recovery and a modified boiler structure. *Elsevier, Applied Thermal Engineering, 178*, 115532.
- Wenfeng, F., & Lanjing W. (2021). Optimal design for double reheat coal-fired power plants with post-combustion CO₂ capture: A novel thermal system integration with a carbon capture turbine. *Elsevier, Energy, 221*, 119838.

- Mei Y., & Yunlong Z. (2022). Performance analysis of an efficient waste heat utilization system in an ultra-supercritical coal-fired power plant. *Elsevier, Energy Reports, 8*, 5871–5882.
- Lihua C., & Di W. (2022). Thermal system for comprehensive utilization of boiler and steam turbine energy of coal-fired power units based on the S-CO₂ cycle. *Elsevier, Energy Reports, 8*, 15286–15295
- Ruifeng C., & Chuanxin Y. (2020). A novel approach to improving load flexibility of coal-fired power plant by integrating high temperature thermal energy storage through additional thermodynamic cycle. *Elsevier, Applied Thermal Engineering, 173*, 115225.
- Ning Y. & Xinzhe G. (2018). A flexible CO capture operation scheme design and evaluation of a coal-fired 2 power plant integrated with a novel DCP and retrofitted solar system. *Energy, 1 – 42*.
- Heng C. & Tong L. (2020). Design and performance evaluation of a new waste incineration power system integrated with a supercritical CO₂ power cycle and a coal-fired power plant. *Elsevier, Energy Conversion and Management, 210*, 112715.
- Haochen L., & Shuyin L. (2020). A regional integrated energy system with a coal-fired CHP plant, screw turbine and solar thermal utilization: Scenarios for China. *Elsevier, Energy Conversion and Management, 212*, 112812.
- Heng C., & Tong L. (2020). An innovative waste-to-energy system integrated with a coal-fired power plant. *Elsevier, Energy, 194*, 116893.
- Sisi Guo & Pei Liu (January 2016). Data reconciliation for the overall thermal system of a steam turbine power plant.
- Ganjehkaviri, & M.N M. Mohd Jaafar. (2014). *Optimization and the effect of steam turbine outlet quality on the output power of a combined cycle power plant*.
- Jalalia,*, Amin Amiri Deloueib. (2019). *Failure analysis in a steam turbine stop valve of a thermal power Plant*. (Received in revised form 25 July 2019; Accepted 28 July 2019)
- Zaixi Zhong a,& Zhaoyi Huo a,*, (2021). *New steam turbine operational mode for a gas turbine combine cycle bottoming cycle system*.
- Lihua Cao a, Xiaoli Li a,* (2022). *Thermal system for comprehensive utilization of boiler and steam turbine energy of coal-fired power units based on the S-CO₂ cycle*. (www.elsevier.com/locate/renene 2021). Recent advances in renewable energy technology for the energy transition.