

Force cooling turbin uap untuk memperpendek waktu pendinginan pada saat shutdown

Abdurrachim¹⁾, Meilinda Nurbanasari²⁾, Hery Sonawan¹⁾ dan Hendi Riyanto³⁾

¹⁾Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan,

²⁾Program Studi Teknik Mesin, FTI, ITENAS

³⁾Program Studi Mesin ,FTMD, ITB

¹abdurrachim@umpas.ac.id

ABSTRAK

Pada PLTU jika terjadi shut down karena jadwal maintenance atau karena trip pada turbin, rumah turbin uap baru bisa dibuka jika kondisinya sudah dingin. Banyak PLTU di Indonesia yang sudah berumur lebih dari 20 tahun yang waktu pendinginan turbin uapnya memerlukan waktu antara 10 hingga 16 hari, sehingga total waktu berhentinya operasional pembangkit menjadi lama, yang berdampak pada berkurangnya kesempatan mendapatkan laba penjualan listrik. Kehilangan pendapatan akibat panjangnya masa tunggu pendinginan ini cukup besar, misalnya untuk PLTU berkapasitas 600 MW, kehilangan produksi listrik mencapai 14.400 MWh/hari. Perhitungan thermo-fluid dan analisis metalurgi untuk penerapan metoda forced cooling pada PLTU super kritik 660 MW menunjukkan waktu total pendinginan turbin adalah 81 jam dan tidak ada dampak pada kekuatan material. Pemasangan peralatan tambahan untuk pelaksanaannya cukup mudah dan biayanya rendah. Teknik turbin forced cooling ini sangat sangat direkomendasikan untuk diterapkan pada PLTU yang masih melakukan proses pendinginan turbin secara konvensional.

Kata kunci: Force cooling, turbin uap, shutdown

Diterima 30 September 2023; **Dipresentasikan** 5 Oktober 2023; **Publikasi** 27 Mei 2024

PENDAHULUAN

Turbin uap pada saat dihentikan operasinya karena ada kerusakan atau karena jadwal maintenance sudah tiba, temperaturnya masih tinggi di sekitar 500 C atau lebih. Untuk memeriksa kondisi di dalamnya, rumah turbin harus sudah berada dalam keadaan yang cukup dingin untuk memungkinkan pembukaannya. Pada kebanyakan PLTU di Indonesia, proses pendinginan turbin tersebut dilaksanakan secara alami sesuai SOP dan memerlukan waktu antara 12 – 17 hari. Dalam empat jam pertama pendinginan, laju penurunan temperaturnya adalah sekitar 0.3°K/menit (18°K/jam) dan kurang dari 0.1 K/menit (6°K/jam) pada jam-jam berikutnya [1]. Laju penurunan temperatur yang diizinkan manufacturer adalah sampai 2 K/menit (120°K/jam). Disini terlihat bahwa ada peluang yang cukup besar untuk mempersingkat waktu pendinginan tersebut agar waktu terhentinya produksi listrik akibat pemeliharaan turbin menjadi pendek.

Beberapa pabrikan Turbin uap telah menerapkan metoda turbine forced cooling dan telah berhasil memperpendek waktu pendinginan turbin dari sekitar 14 hari menjadi hanya 4 hari saja.

Dengan demikian durasi waktu pemeliharaan

turbin menjadi 10 hari lebih pendek, sehingga waktu efektif untuk memproduksi listrik menjadi bertambah 10 hari.

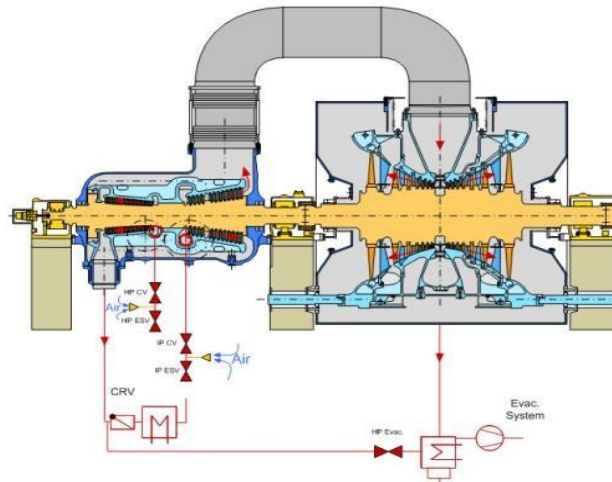
Media pendingin yang digunakan adalah udara yang dialirkan ke dalam rumah turbin melalui saluran saluran yang terhubung ke rumah turbin seperti saluran uap masuk dan keluar turbin, saluran reheat ataupun saluran ekstraksi uap. Untuk menghindari thermal stress pada material turbin dan laju pendinginan yang terlalu cepat, udara pendingin sebelum dialirkan ke rumah turbin dipanaskan secara bertahap mulai pada 250°C, 200°C, 150°C dan 40 °C. Pengaliran udara dilakukan ketika temperatur dalam turbin sudah mencapai sekitar 400°C di saat turning gear dijalankan.

Saat ini untuk turbine forced cooling beberapa patent sudah diterbitkan, diantaranya : PATEN EP 2 871 329 B1 (2014), PATEN US2017/0067364 A1 (tahun 2017), Patent dari Siemens dan General Electric [2,3,4]

Siemens AG [3,5] menerapkan metode percepatan pendinginan pada turbin uap dengan cara mengisap udara dari ruangan masuk Turbin dengan menggunakan pompa vakum kondensor. Untuk pelaksanaannya hanya diperlukan tambahan instalasi nosel dan saringan (*filter*) udara yang dipasang di saluran uap masuk turbin,

seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Durasi waktu pendinginan turbin adalah 75 jam, yang terbagi atas periode pendinginan oleh uap yang masih dialirkan ke dalam turbin setelah shut down sampai aliran uap berhenti dan periode pendinginan dengan udara yang dihisap pompa

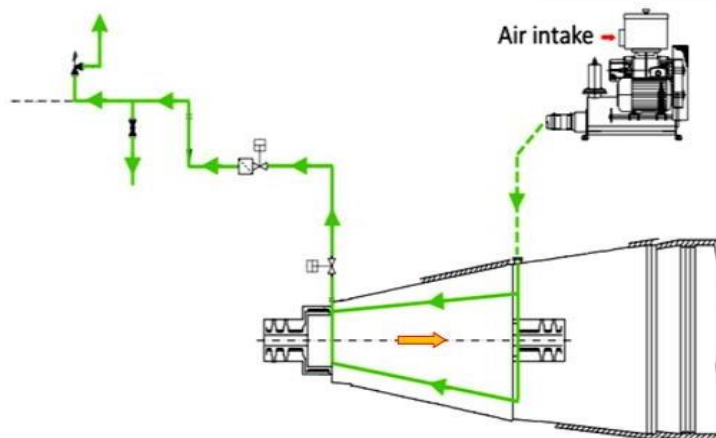
vakum. Dalam periode pertama temperatur turbin turun dari 450°C menjadi 380°C selama 15 jam dan dalam perioda forced cooling temperature turbin turun sampai 150°C selama 60 jam.



Gambar 1. Metode Percepatan Pendinginan Patent Siemens [5]

Berbeda dengan metode Siemens, metode GE (*General Electric*) menggunakan udara tekan (*pressured air*) sebagai media pendingin turbin

uap (lihat Gambar2). Udara pendingin dimasukkan ke dalam turbin



Gambar 2. Metode Turbine Forced Cooling, Patent GE [4] secara *counter-flow* terhadap arah aliran uap.

Di Indonesia, salah satu pembangkit yang telah menerapkan Teknik Turbine forced cooling adalah PLTU Superkritik Cirebon Electric Power, kapasitas 660 MW. Forced cooling dilaksanakan ketika temperature turbin sudah turun mencapai 420°C. Udara pendingin menggunakan instrument air yang terlebih dahulu dipanaskan sesuai kebutuhan.. Temperatur metal turbin diakhir periode

pendinginan paksa adalah 175°C. Total waktu pendinginan adalah 75 jam termasuk waktu pendinginan oleh aliran uap dari sejak shut down sampai aliran uap dihentikan.

Kajian teknik forced cooling pada Turbin uap ditinjau dari aspek thermo fluida.

Proses pendinginan paksa turbin uap (turbine forced cooling) sebelum rumah turbin dibuka,

dibagi menjadi 4 periode, yaitu :

- 1) periode pendinginan selama proses penurunan beban dengan cara mengatur penurunan tekanan, temperatur dan laju massa uap masuk turbin sampai aliran uap terhenti,
- 2) periode pendinginan alamiah pada saat poros berputar bebas (tanpa beban) dan pasokan uap
- 3) (*main and reheat*) dihentikan,
- 4) periode pendinginan alamiah ketika poros sudah berhenti berputar dan kemudian *turning gear* dioperasikan untuk memutar poros turbin agar poros turbin tidak bending/melendut, dan untuk menyeragamkan temperatur turbin,
- 5) periode pendinginan paksa (forced cooling) hingga tercapai temperatur izin buka rumah turbin dan penghentian *turning gear*.

Analisa termal proses turbine forced convection ini dilakukan mengikuti kaidah-kaidah termodinamika perpindahan panas, dan ditujukan untuk melakukan perhitungan durasi waktu periode pendinginan alamiah dan poros berputar bebas; perhitungan durasi waktu periode pendinginan alamiah perhitungan durasi waktu tahap pendinginan paksa, yaitu mulai dari akhir periode pendinginan alamiah hingga persyaratan temperatur pembukaan cangkang dipenuhi dan perhitungan penurunan tekanan dalam pipa udara instrumen/servis dan turbin dan perhitungan tegangan termal pada poros turbin sebagai akibat dari proses pendinginan paksa. Perhitungan waktu pendinginan tersebut diuraikan berikut ini

HASIL PERHITUNGAN DAN ANALISIS.

Periode Poros Berputar Bebas

Hasil perhitungan ditunjukkan pada Gambar 3. Durasi waktu periode poros berputar tanpa beban bersamaan dengan penurunan kecepatan putar poros dan penurunan laju aliran uap sampai nol/ poros terhenti adalah 70 menit.

Periode Pendinginan Alamiah

Durasi waktu periode pendinginan alamiah ditetapkan selama 6 jam. Distribusi aksial temperatur awal rotor turbin diputar dan pada jam ke 6 ditunjukkan pada Gambar 4. dan

Gambar 5. Pada periode pendinginan alamiah ini temperatur turbin akan mengalami penyeimbangan antara bagian yang bertemperatur tinggi dan yang bertemperatur rendah.

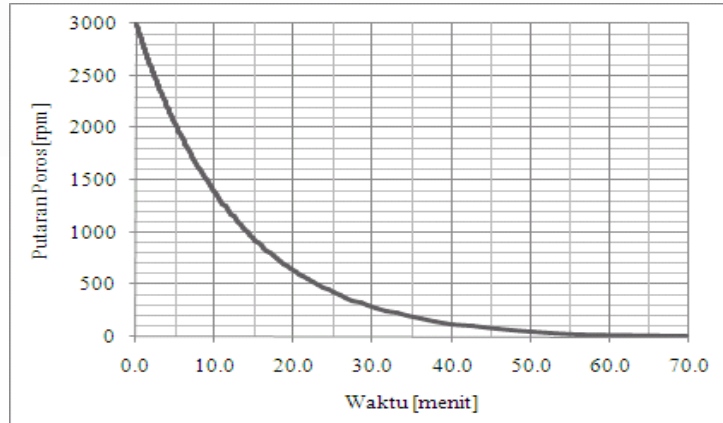
Periode Pendinginan Paksa

Periode pendinginan paksa menyusul setelah periode pendinginan alamiah dengan poros turbin tetap diputar oleh *turning gear*. Udara instrumen/servis, yang temperaturnya dikendalikan, digunakan sebagai media pendinginan paksa. Laju alir massa udara yang dimasukkan di turbin HP adalah 1,39 kg/s, yaitu dua kali kapasitas satu kompresor udara instrumen/servis. Laju alir massa udara pada laju alir massa yang sama, yaitu sebesar 1,39 kg/s dimasukkan ke turbin IP dan LP. Pengaturan temperatur udara pendingin ditunjukkan dalam Tabel 4, yang didisain agar laju pendinginan terkendali.

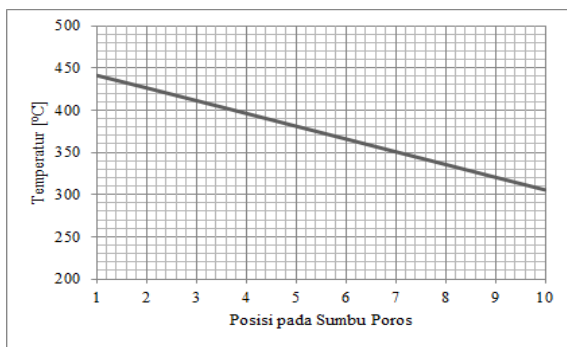
Pada 6 jam pertama periode pendinginan paksa, temperatur udara pendingin ditetapkan pada 150°C dengan daya pemanas sebesar 167 kW. Pada jam ke-6 hingga jam ke-12, temperatur udara pendingin diturunkan menjadi 100°C, dengan daya pemanas sebesar 97 kW. Selanjutnya, pada jam ke-12 hingga jam ke-75, yaitu akhir periode pendinginan paksa, tidak diperlukan lagi pemanasan udara pendingin. Pada akhir periode pendinginan paksa, distribusi aksial temperatur rotor turbin HP dan IP ditampilkan pada Gambar 8 dan Gambar 9. Distribusi temperatur dalam arah radial pada turbin HP dan IP dapat dianggap seragam karena koefisien perpindahan panas konveksinya jauh lebih rendah dari konduktivitas termal metal ($Biot < 0,1$).

Penurunan Tekanan udara pendingin

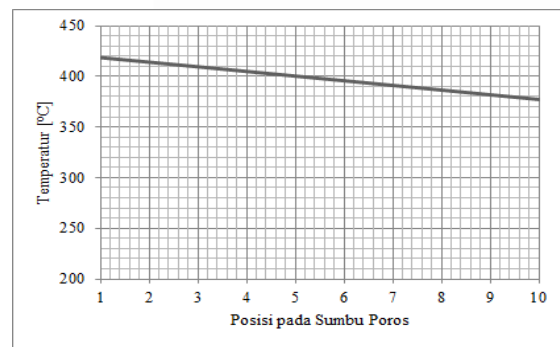
Penurunan tekanan udara pendingin terjadi akibat friksi antara udara dan pipa penyalur udara serta antara udara dan turbin. Perhitungan penurunan tekanan pada turbin HP dan IP menghasilkan penurunan tekanan yang sangat kecil yaitu sebesar 0,55 Pa dan 0,34 Pa. Penurunan tekanan pada pipa saluran udara pendingin yang berdiameter dalam 48 mm adalah 0,134 bar/m. Untuk memperkecil penurunan tekanan, diameter dalam saluran udara pendingin dibuat sebesar 72 mm sehingga penurunan tekanan (per panjang saluran) bisa mencapai 0,0152 bar/m, cukup baik untuk diterapkan.



Gambar 3. Penurunan Putaran Poros pada Periode Poros Berputar Bebas.

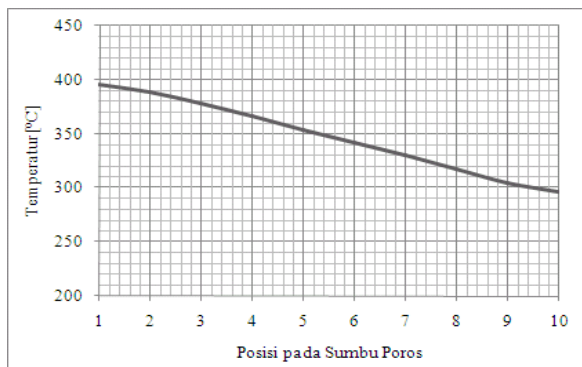


(a)

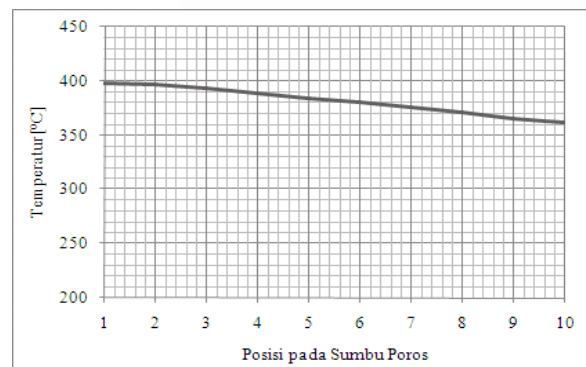


(b)

Gambar 4. Distribusi Aksial Temperatur Turbin (a) HP dan (b) IP pada saat Awal Periode Pendinginan Alamiyah



(a)

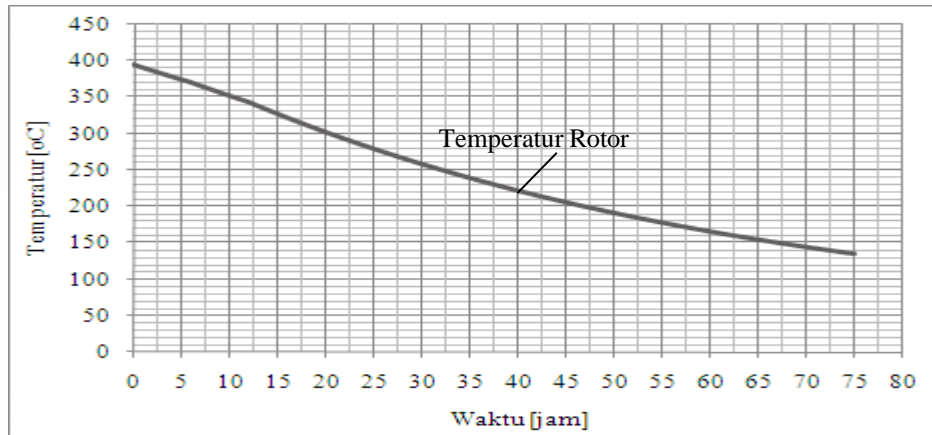


(b)

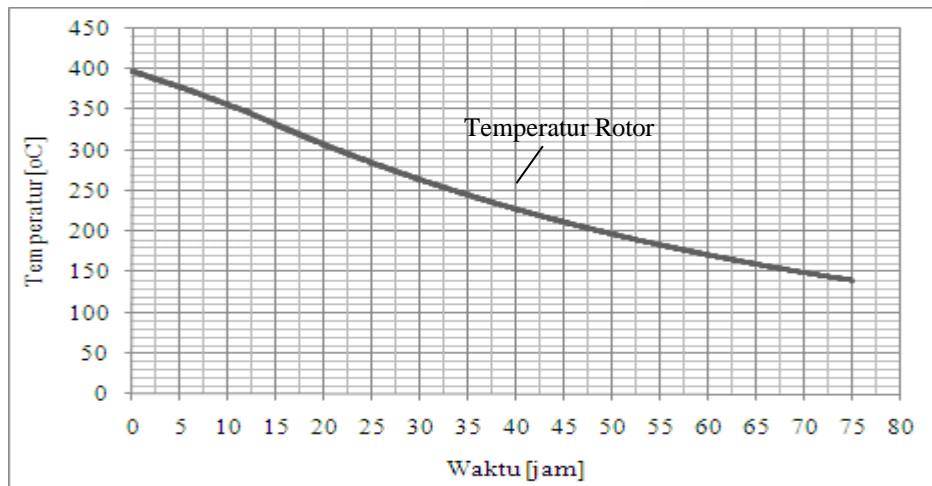
Gambar 5. Distribusi Aksial Temperatur Turbin (a) HP dan (b) IP pada Jam ke-6 Periode Pendinginan Alamiyah

Tabel 4. Pengaturan Temperatur Udara Pendingin dan daya pemanas

No.	Waktu [jam]	Temperatur [°C]	Daya [W]
1	0 ~ 6	150	167 x 2
2	6 ~ 12	100	97 x 2
3	12 ~ 75	30	0

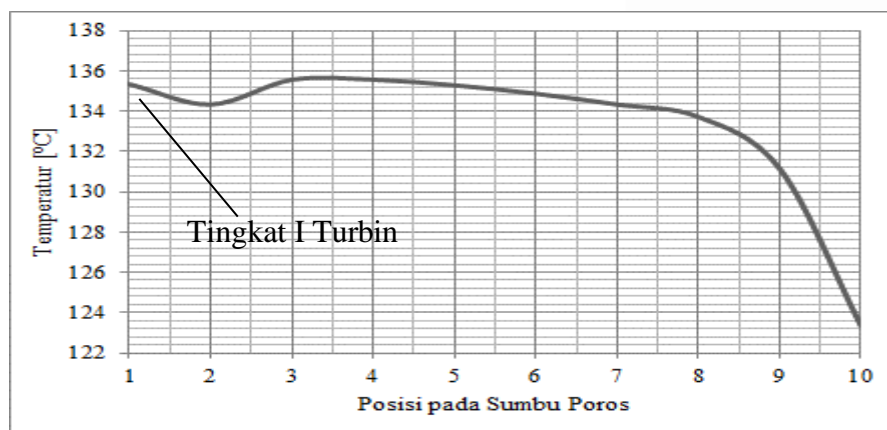


Gambar 6. Waktu Penurunan Temperatur 1st Stage Metal Pendinginan Paksa Turbin HP



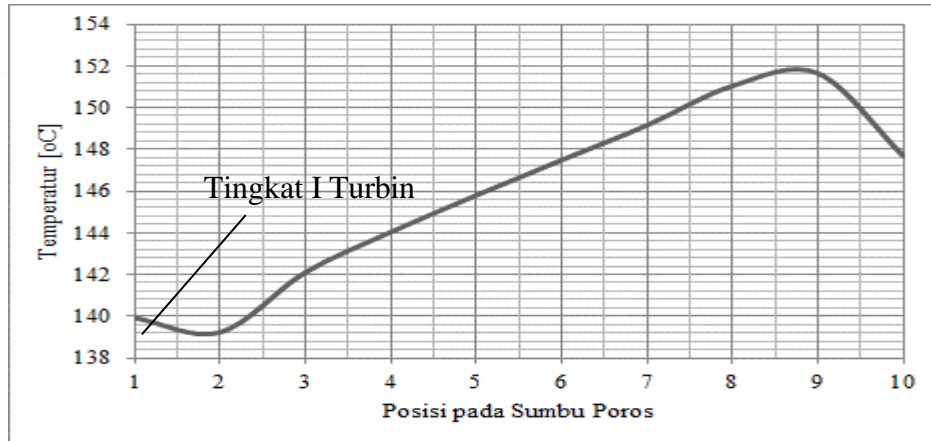
Gambar 7. Waktu Penurunan Temperatur 1st Stage Metal Pendinginan Paksa Turbin IP.

Pada Gambar 8 dan Gambar 9 terlihat bahwa temperature bagian tengah rotor lebih tinggi dari pada temperature 1st stage metal, yaitu temperatur rotor disisi masuk udara



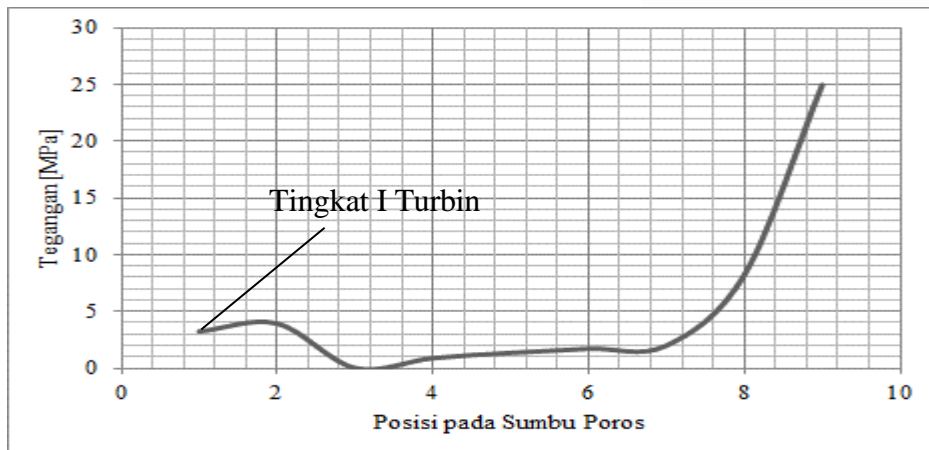
Gambar 8. Distribusi Aksial Temperatur Rotor Turbin HP pada Akhir Periode Pendinginan Paksa

pendingin pada periode pendinginan paksa. Kecenderungan ini mirip dengan distribusi temperatur rotor turbin HP dan IP yang dialami pada penerapan metode Siemen.



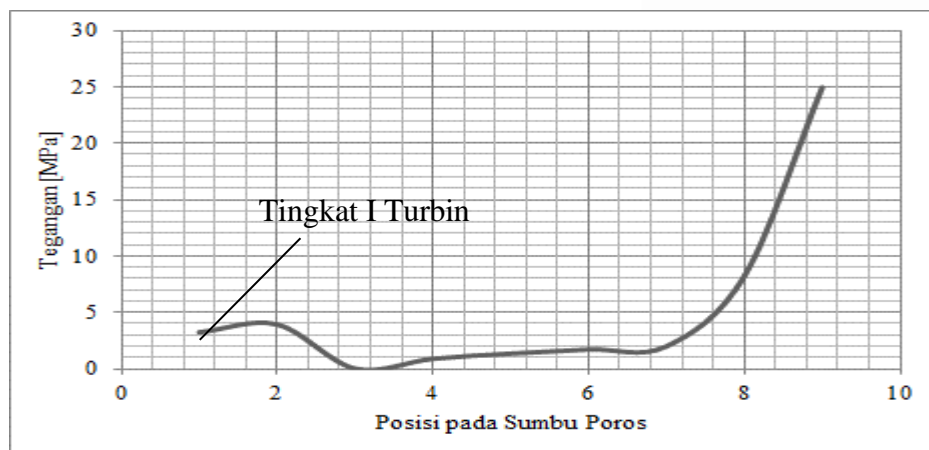
Gambar 9. Distribusi Aksial Temperatur Rotor Turbin IP pada Akhir Periode Pendinginan Paksa

Tegangan Thermal



Gambar 10. Tegangan Termal Turbin HP pada Akhir Periode Pendinginan Paksa

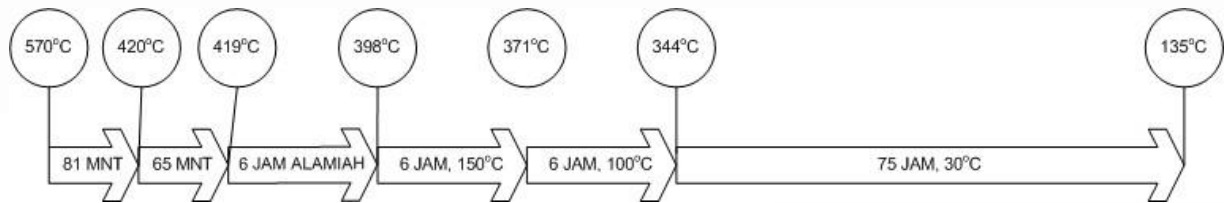
Hasil perhitungan tegangan termal pada akhir periode pendinginan paksa yang terjadi sebagai akibat perbedaan temperatur pada arah aksial pada turbin HP dan IP diperlihatkan pada Gambar 10 dan Gambar 11. Tegangan termal maksimum yang terjadi adalah 25 MPa.



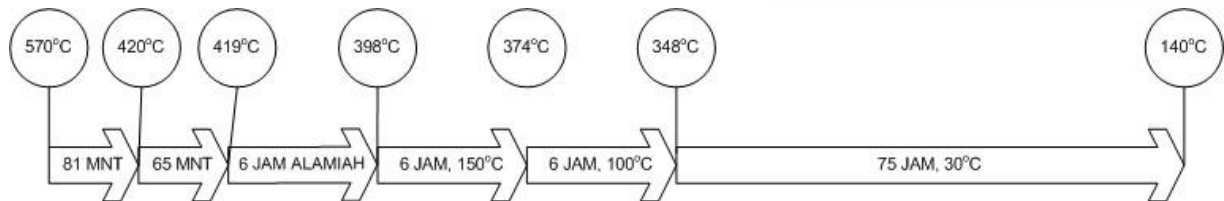
Gambar 11. Tegangan Termal Turbin IP pada Akhir Periode Pendinginan Paksa

Dari hasil analisis, dibuat skema proses percepatan pendinginan pada turbin HP dan turbin `IP PLTU

Jateng 2 dan ditampilkan pada Gambar 12 dan Gambar 13.



Gambar 12. Skema Proses Percepatan Pendinginan Turbin HP.



Gambar 13. Skema Proses Percepatan Pendinginan Turbin IP.

Penurunan tekanan dalam turbin HP dan turbin IP, masing-masing adalah 0,55 Pa dan 0,34 Pa, sangat kecil.

Penurunan tekanan persatuan panjang saluran udara pendingin berdiameter 72 mm adalah 0,0152 bar/m. Untuk penurunan tekanan dari *header* udara instrumen/servis ke saluran udaramasuk turbin sebesar 4 bar, panjang ekivalen saluran adalah 260 m, sehingga bisa dipastikan bahwa proses percepatan pendinginan bisa terlaksana.

Tegangan termal uniaksial maksimum pada rotor turbin HP maupun turbin IP sebagai akibat dari distribusi temperatur dalam rotor adalah 25 MPa, kecil dibandingkan dengan kekuatan *yield* dari material rotor (CrMoV) yaitu disekitar 400 MPa.

Kajian teknik forced cooling pada Turbin uap dari aspek kegagalan material

Dalam penerapan *turbine forced cooling* terdapat dua aspek yang berkaitan dengan kegagalan material yaitu [2]:

(a) Aspek *thermal stress*

Tekanan udara pendingin yang dialirkan ke dalam turbin hanya sedikit di atas tekanan atmosfer. Proses pendinginan dilakukan juga dengan kecepatan rotasi kecil dan tanpa beban sehingga *mechanical stress* yang akan terjadi dapat diabaikan dan hanya menyisakan *thermal stress* akibat dari perubahan temperatur di dalam komponen. *Thermal*

stress yang diakibatkan dari *forced cooling* dapat terjadi karena adanya *gradient temperature* pada bagian permukaan hingga ke bagian dalam komponen.

(b) Aspek elongasi

Jarak bebas antara rotor dan komponen stasioner harus dijaga dalam batas yang diijinkan. Laju pendinginan turbin uap biasanya dipantau melalui pengukuran temperatur *inner casing*, temperatur *outer casing*, *outer casing absolute elongation* dan *rotor absolute elongation*. Pengukuran keempat parameter tersebut tidak memungkinkan untuk dilakukan dan sampai sejauh ini tidak ada informasi yang dapat diketahui tentang suhu rotor ataupun elongasi yang dialami casing bagian dalam. Jika merujuk pada laju pendinginan yang direkomendasikan oleh *manufacturer* turbin supercritical boiler PLTU Jateng 2 yaitu 3-5 °C/jam dan hasil perhitungan aspek termo fluid dimana laju penurunan temperturnya adalah 3,44-3,48 °C/jam, maka dapat disimpulkan bahwa jarak bebas antara rotor dan komponen stasioner berada dalam batas aman.

Pengaruh Thermal Stress Pada Komponen Material

Tahap *forced cooling* yang akan dilakukan pada *supercritical boiler* PLTU Jateng 2 Adipala dimulai setelah *turning gear on* dimana *first stage metal temperature* pada suhu 400°C. Fasa yang terbentuk pada *first stage metal temperature* bersifat stabil dan

dalam kesetimbangan sehingga tidak akan mengalami perubahan fasa. Oleh karena itu dapat dipastikan bahwa *thermal stress* akibat perubahan fasa dapat diabaikan. Hasil perhitungan *thermal stress* yang terjadi pada shaft akibat proses *forced cooling* dengan laju pendinginan 3,48°C/jam adalah sebesar 25 Mpa, jauh dibawah nilai S_y material shaft (jenis CrMoV) yaitu berkisar 400 Mpa. Dipastikan bahwa penerapan *forced cooling* yang direncanakan ini tidak menimbulkan perubahan sifat mekanis dan degradasi material komponen turbin.

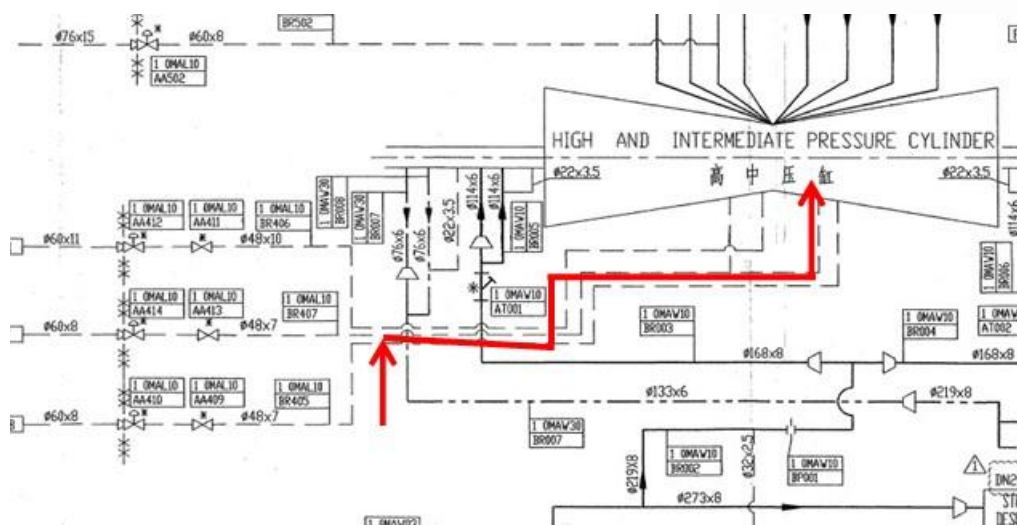
Analisis selanjutnya adalah pemeriksaan terhadap kemungkinan kegagalan material yang biasa terjadi akibat perlakuan thermal, yaitu over heated, creep dan fatigue [6]. Creep adalah mekanisme deformasi plastis yang terjadi pada komponen akibat terekspos pada temperatur > 482°C dengan beban konstan dan dalam waktu lama [7]. *Forced cooling* dilakukan mulai temperatur 400°C, jadi tidak akan menurunkan ketahanan creep material. Dengan demikian penerapan *forced cooling* tidak mempengaruhi sisa umur pakai komponen.

Thermal fatigue dapat terjadi tanpa beban mekanik. Tegangan termal dihasilkan oleh ekspansi dan kontraksi material secara siklik ketika suhu berubah karena faktor geometris komponen. Pada *thermal fatigue*, kegagalan diawali dengan adanya *initial crack* yang dapat terjadi setelah siklus pemanasan dan pendinginan berkali-kali dan berlanjut dengan *crack propagation*. Indikator kegagalan

thermal fatigue biasanya lebih pada faktor regangan daripada tegangan [8]. *Low cyclic thermal fatigue* mirip dengan kegagalan creep-rupture. Faktor metalurgi yang paling penting adalah keuletan dan ketangguhan. Bahan yang sangat ulet cenderung lebih tahan terhadap *thermal fatigue*. Material ulet juga lebih tahan terhadap inisiasi dan propagasi retakan [9]. Jenis baja yang digunakan pada komponen supercritical boiler memiliki sifat mekanis yang stabil pada temperatur tinggi dan memiliki ketahanan fatigue yang bagus. Dari uraian di atas, penerapan *forced cooling* pada dasarnya tidak menimbulkan *cyclic thermal stress* yang besar dan tidak akan menurunkan ketahanan material terhadap *thermal fatigue*.

Rencana Penerapan Turbine forced cooling pada PLTU Superkritik Jateng 2

Setelah mempelajari dokumen disain dan survey lapangan PLTU Superkritik Jateng 2 maka diusulkan penggunaan instrument air bertekanan dengan penambahan alat pemanas udara, titik injeksi udara pendingin (tapping point) udara dipilih pada saluran pipa “*HP Inner Casing Drain*”, udara panas mengalir ke sisi dalam Turbin HP mengikuti arah aliran *main steam* dan ke luar melalui pipa *Cold Reheat* dan pipa *steam drain CRH*. Untuk turbin IP injeksi udara pendingin dilakukan pada pipa “*HP Exhaust Drain*” mengalir ke sisi dalam IP Turbin mengikuti aliran uap dan selanjutnya keluar melalui pipa *IP steam exhaust*.



Gambar 11. Rencana tapping point dari udara pendingin ke IP-Turbine drain line

Perlu ditambahkan pemanas udara dan asesoriesnya untuk penyaluran udara dari saluran instrument air terdekat ke tapping point di Turbin HP dan IP .

Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari kajian ini antara lain:

1. *Forced cooling* dapat diterapkan pada turbin PLTU Superkritik Jateng 2 menggunakan instrument air., dengan *Tapping point* untuk injeksi udara pendingin pada turbin HP dipilih pada jalur *steam seal drain line* dan keluar pada jalur *cold reheat line* dan untuk turbin IP tapping point injeksi udara adalah pada jalur *steam seal drain line* dan keluar pada jalur *main steam line* ke turbin LP. Total waktu pendinginan Turbin adalah 81 jam (dari biasanya 17 hari)
2. Penerapan *forced cooling* pada PLTU Super kritik Jateng 2 tidak akan mempengaruhi kekuatan material Turbin.
3. Penerapan metoda Forced Cooling pada PLTU Superkritik Jateng 2 sangat dianjaaurakan karena dapat mengamankan potensi kehilangan produksi listrik setara 190.080.000 kWh. Atau sebesar Rp, 190,080.000.000,- bila dinilai harga listrik RP 1000,-/kWh

Acknowledgment

Penulis menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang setinggi tingginya kepada pihak management dan pimpinan PT Indonesia Power – PLTU Superkritik Jateng 2 dan PT Cirebon Power atas kesempatan bantuan dan kerja sama yang telah diberikan untuk melakukan kajian ini. Semoga hasil kajian ini bermanfaat bagi semua.

PUSTAKA

1. Kosman, W., *Feasibility study of forced cooling of a supercritical steam turbine after a shut down of a power generating unit*. Archives of Thermodynamics, 2011. **32**(3): p. 201-214.
2. Gobrecht, E., S. Riemann, and G. Zimmer, *Method for Cooling Down a Steam Turbine*, 2017: United States.
3. Noname, *Steam Turbine Life Time Calculations and Life Limiting Factors*. Siemens AG, 2017.
4. Noname, *Forced air cooling system*. General

Electric, 2017.

5. Röhr, F., Feldmüller, A, *Accelerated Cool-down of Back-pressure Steam Turbine*. Siemens AG, 2013.
6. Shibli, A., *Coal Power Plant Materials and Life Assessment: Developments and Applications*. 2014: Elsevier.
7. Wardle, T. *Creep-rupture assessment of superheater tubes using nondestructive oxide thickness measurements*. in *BR-1697 ICOLM (International Conference on Life Management and Life extension of Power Plants) Xian, PR China*. 2000.
8. Xin, Q., *Diesel engine system design*. 2011: Elsevier.
9. Boyce, M.P., *Gas turbine engineering handbook*. 2011: Elsevier.