

Simulasi perilaku transien *steam generator* pada *high temperature gas-cooled nuclear reactor* 150 MWt pada kondisi kecelakaan *depressurized loss of forced cooling* menggunakan program RELAP5-3D

Noval Wahyu Ardiansyah, Alexander Agung, Kutut Suryopratomo

Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika 2 Yogyakarta 55281

E-mail: a_agung@ugm.ac.id

Abstrak. Salah satu komponen penting dalam pembangkitan daya pada reaktor nuklir adalah *steam generator*. *High Temperature Gas-Cooled Nuclear Reactor* (HTGR) merupakan salah satu reaktor nuklir dengan suhu keluaran yang tinggi serta menggunakan *steam generator* berjenis *once through helical coil*. Salah satu potensi kecelakaan dasar desain pada HTGR adalah *Depressurized Loss of Forced Cooling* (DLOFC) di mana tekanan pendingin reaktor turun secara signifikan akibat patahan pada saluran pendingin. Transien tekanan dan aliran pendingin ini akan mempengaruhi perilaku dinamik *steam generator*. Program RELAP5-3D digunakan untuk mensimulasikan respon kejadian transien pada *steam generator* reaktor HTR berdaya 150 MWt berdasar pada hukum konservasi massa, momentum dan energi yang dirumuskan sebagai *two-fluid model* beserta relasi-relasi penting hidrodinamika yang lain. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penurunan laju aliran massa pada sistem primer akan mengakibatkan daya, suhu pendingin primer, suhu pendingin sekunder, fraksi *void* menjadi turun. Kenaikan atau penurunan tekanan pada sistem pendingin primer akan menyebabkan daya, suhu pendingin primer, suhu pendingin sekunder, fraksi *void* akan menurun namun akan kembali seperti semula ketika tidak ada perubahan tekanan. Kondisi DLOFC dengan penurunan laju aliran massa sebesar 88,2% dan tekanan sebesar 88,2% menyebabkan turunnya daya sebesar 9 MWt, suhu pendingin primer sebesar 47,33 K, suhu pendingin sekunder sebesar 60,36 K dan fraksi *void* sebesar 0,0113.

1. Pendahuluan

Perubahan paradigma dan orientasi pembangunan energi yang kini sangat dibutuhkan untuk menggeser titik tumpunya pada pemanfaatan energi baru dan terbarukan. Energi fosil yang terbatas akan terus berkurang jumlahnya jika tidak diantisipasi secara tepat dan cepat maka akan membawa Indonesia ke situasi krisis energi nasional, yang nantinya akan menghambat rencana pembangunan nasional dalam jangka panjang. Renstra Kementerian ESDM 2014-2019 menargetkan pemanfaatan energi non-BBM dalam bauran energi nasional diarahkan pada peningkatan porsi energi baru terbarukan (EBT), dimana ditargetkan sebesar 10% pada tahun 2015 dan meningkat menjadi 16% pada tahun 2019. Perpres No. 5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional menargetkan EBT dapat menyumbang 17% energi nasional pada tahun 2025. Hal tersebut juga berkaitan dengan rencana

pemerintah untuk tahun 2015 hingga 2019 dalam pembangunan pembangkit listrik sebesar 35000 MW [1].

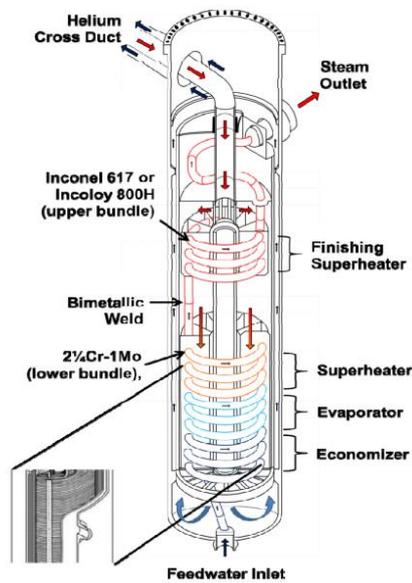
Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) berencana membangun Reaktor Daya Eksperimental (RDE), untuk dapat melakukan eksperimen dan pemenuhan sebagian energi listrik di kawasan PUSPIPTEK. Sehubungan dengan hal tersebut maka dipilih reaktor dengan daya berkisar 10 MWt hingga 30 MWt bertipe reaktor gas bertemperatur tinggi (*High Temperature Gas-cooled Reactor/HTGR*). Untuk pengembangannya desain RDE dibuat berdasarkan *benchmark* HTR-10 milik Cina [2]. RDE nantinya akan dikembangkan menjadi 150 MWt dengan tujuan reaktor daya komersil dan menggunakan *benchmark* HTR-PM.

HTGR adalah jenis reaktor berpendingin gas yang dapat menghasilkan daya yang besar. HTGR menggunakan pendingin primer gas helium dengan sistem pendingin sekunder berupa air. Pada HTGR digunakan *steam generator* dengan *tube* berbentuk seperti kumparan, atau biasa disebut dengan *Helical-Coil Steam Generator*, dengan arah aliran vertikal yang berlawanan. Gaya sentrifugal yang terjadi pada *helical tube* memberikan performa perpindahan panas yang lebih baik daripada *tube* yang berbentuk lurus [3]. *Helical-coil tube* memberikan ukuran yang lebih ramping namun meningkatkan perpindahan panas. Penukar kalor dengan *helical-coil* memiliki 16 sampai 43 % koefisien perpindahan panas yang lebih besar daripada penukar kalor dengan *tube* lurus. Luasan perpindahan panas yang lebih besar dibutuhkan untuk meningkatkan jumlah daya termal. Hal tersebut dapat dilakukan dengan menambah banyaknya *tube* dan memanjangkan panjang *tube*. Mengurangi jarak antara *tube* tidak hanya dapat mengurangi ukuran dari *steam generator* tetapi juga meningkatkan daya termal [4].

Terjadinya perilaku tidak normal pada reaktor dapat menyebabkan berbagai kejadian di sistem primer maupun sistem sekunder. *Steam generator* yang merupakan bagian dari sistem sekunder adalah piranti utama dalam proses pengambilan kalor pada fluida pendingin [5]. Hal yang sangat berpengaruh pada proses pengambilan kalor adalah laju alir massa fluida, temperatur fluida, tekanan, geometri *steam generator* serta koefisien laju kalor. Apabila terdapat perilaku yang tidak normal pada reaktor maka dapat berdampak pula pada *steam generator*. Salah satu potensi kecelakaan dasar desain pada HTGR adalah *Depressurized Loss of Forced Cooling* (DLOFC) di mana tekanan pendingin reaktor turun secara signifikan akibat patahan pada saluran pendingin [6]. Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah mendapatkan perilaku dinamik *steam generator* seperti daya, suhu dan fraksi *void* pada HTR 150 MWt menggunakan RELAP5-3D [7] pada kondisi DLOFC.

2. Helical coil steam generator

Rencana pengembangan dari RDE BATAN adalah membuat reaktor komersil dengan daya 150 MWt. Reaktor komersil tersebut tentunya masih dalam tahap desain sehingga perubahan parameter pada desain reaktor masih dimungkinkan, termasuk di antaranya terkait dengan desain *steam generator*. Salah satu desain *steam generator* dengan fluida kerja helium-air yang dapat diadopsi pada reaktor komersial 150 MWt adalah *steam generator* pada reaktor NGNP (*Next Generation Nuclear Plant*). *Steam generator* tersebut berjenis *helical-coil* dan mempunyai susunan yang sederhana karena hanya memiliki 1 buah *helical assembly* saja. Gambar 1 menampilkan skema *steam generator* NGNP.



Gambar 1. Skema steam generator NGNP [4].

Desain *steam generator* yang dipakai NGNP berdasarkan desain *steam generator* yang ada pada MHTGR (*Modular High Temperature Gas-Cooled Reactor*) yang memiliki orientasi vertikal, berjenis *once-through, up-boiling, cross-counter-flow* dan memiliki *shell* serta *tube*. Pipa-pipa *heat exchanger* yang ada pada desain *steam generator* NGNP berbentuk melingkar dan membentuk seperti sebuah kumparan besar. Desain *steam generator* NGNP dipisahkan menjadi *upper-bundles* dan *lower-bundles*. *Upper-bundles* akan bersinggungan langsung dengan pendingin primer helium yang memiliki panas mencapai 750 °C sehingga memerlukan paduan logam dengan ketahanan panas yang sangat tinggi seperti *Inconel 617* dan *Inconel 800H*. Paduan logam tersebut memiliki ketahanan terhadap korosi yang tinggi dan struktur yang kuat pada panas yang tinggi. *Upper-bundles* dan *lower-bundles* dihubungkan dengan penghubung *bimetal*. *Lower-bundles* akan bekerja pada suhu yang lebih rendah daripada *upper-bundles* sehingga pada bagian bawah *steam generator* ini digunakan paduan logam 2-1/4Cr-1Mo [4].

3. Model matematis hidrodinamika dan perpindahan panas

Model hidrodinamika yang berlaku pada sistem yang akan ditinjau adalah model dua fluida (*two-fluid model*) untuk campuran dua fase cair-gas yang diformulasikan dalam parameter-parameter rerata volume dan waktu [7]. Persamaan-persamaan diferensial aliran dua fluida tersebut membentuk sistem persamaan eliptik dengan permasalahan nilai awal dan batas yang selanjutnya secara numerik diselesaikan menggunakan metode beda-hingga semi implisit dengan skema solusi untuk perubahan waktu menggunakan *solver* BPLU. Fenomena aliran dua fluida diwujudkan dalam bentuk persamaan konservasi massa, momentum dan energi.

Persamaan kontinuitas massa untuk masing-masing fase fluida dinyatakan sebagai berikut

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_k \rho_k v_k) = \Gamma_k \quad (1)$$

dengan indeks k menyatakan jenis fase fluida ($k=g$ untuk gas, dan $k=l$ untuk cair), α adalah fraksi volume, ρ adalah densitas, v adalah kecepatan fluida dan Γ adalah laju pertukaran massa.

Persamaan konservasi momentum untuk masing-masing fase fluida dapat dituliskan sebagai berikut

$$\alpha_k \rho_k \frac{\partial v_k}{\partial t} + \frac{1}{2} \alpha_k \rho_k \frac{\partial v_k^2}{\partial x} = -\alpha_k \frac{\partial P}{\partial x} + \alpha_k \rho_k B_x - \alpha_k \rho_k F_{w,k} \cdot v_k + \Gamma_k (v_{kl} - v_k) - \alpha_k \rho_k F_{i,k} (v_k - v_j) - C \alpha_k \alpha_j \rho_m \left[\frac{\partial (v_k - v_j)}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_k}{\partial t} - v_k \frac{\partial v_l}{\partial t} \right] \quad (2)$$

dengan indeks i menyatakan jenis fase imbalanced, P adalah tekanan, B_x adalah *body force* pada arah koordinat x , F_w adalah koefisien *drag force* pada dinding, F_i adalah koefisien *drag force* antar fase, dan C adalah koefisien massa.

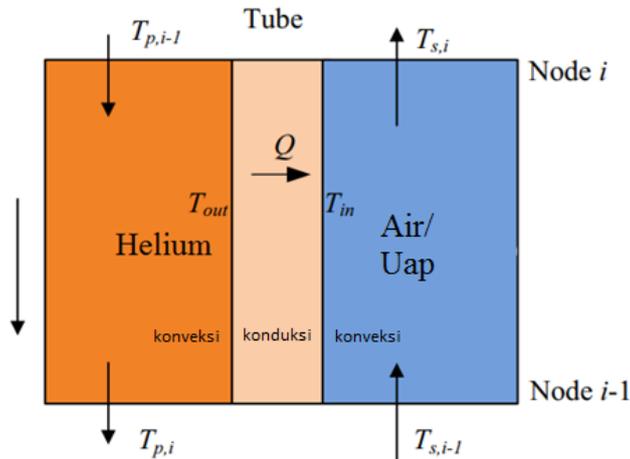
Persamaan konservasi energi termal untuk masing-masing fase dinyatakan sebagai

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_k \rho_k U_k) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_k \rho_k v_k U_k A) = -P \frac{\partial \alpha_k}{\partial t} - \frac{P}{A} \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_k \rho_k A) + Q_{w,k} + Q_{i,k} + \Gamma_{ik} h_k^* - \Gamma_w h_k' + \alpha_k \rho_k F_{w,k} v_k^2 \quad (3)$$

dengan U adalah energi internal, Q_w dan Q_i masing-masing adalah laju pembangkitan kalor di dinding dan antarmuka, dan h menyatakan entalpi.

Persamaan konservasi massa, momentum dan energi tersebut diaplikasikan pada *steam generator*.

Proses perpindahan panas antara *tube* dapat digambarkan seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Pemodelan perpindahan panas.

Perpindahan konduksi adalah perpindahan panas pada benda yang tidak bergerak. Bentuk integral dari persamaan konduksi dapat dinyatakan sebagai berikut

$$\iiint_V \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dV = \iint_S k \nabla T \cdot ds + \iiint_V S \cdot dV \quad (4)$$

dengan C_p adalah kapasitas panas, T adalah suhu, k adalah konduktivitas material dan S adalah sumber kalor.

Dari Gambar 2 dapat diketahui laju transfer panas dari sistem helium primer adalah sebagai berikut

$$Q = W_p C_p (T_{p,i-1} - T_{p,i}) \quad (5)$$

dengan Q adalah laju transfer panas (J/s), W_p adalah laju aliran massa dari helium pada sistem primer *steam generator* (kg/s), h_p adalah entalpi helium (J/kg), c_p adalah kapasitas panas fluida (J/kg-K), T_p adalah suhu dari helium (K). Laju transfer panas pada sistem sekunder untuk air/uap didapatkan sebagai berikut

$$Q = W_S c_P (T_{S,i-1} - T_{S,i}) \quad (6)$$

dengan W_S adalah laju aliran massa dari air/uap pada sistem sekunder *steam generator* (kg/s), c_P adalah kapasitas panas fluida (J/kg-K), T_S adalah suhu dari air/uap (K).

Proses konveksi pada pendingin primer maupun sekunder terhubung dengan proses konduksi pada *tube* melalui syarat batas antarmuka sebagai berikut

$$-k\nabla T = h(T_w - T) \quad (7)$$

dengan h adalah koefisien konveksi dan T_w adalah suhu permukaan *tube*.

Persamaan momentum digunakan untuk mendapatkan distribusi tekanan pada pipa. Besarnya *pressure drop* total didapatkan dari *pressure drop* percepatan, gesek dan gravitasi.

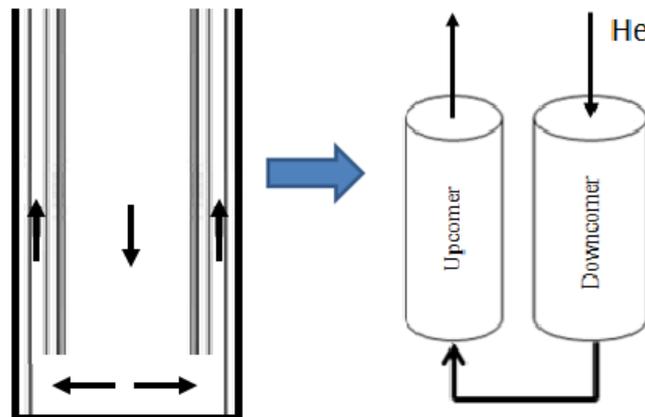
$$\Delta P = \Delta P_{acc,i} + \Delta P_{fri,i} + \Delta P_{gra,i} \quad (8)$$

dengan $\Delta P_{acc,i}$ adalah *pressure drop* yang dikarenakan oleh percepatan, $\Delta P_{fri,i}$ adalah *pressure drop* yang dikarenakan oleh gesekan, $\Delta P_{gra,i}$ adalah *pressure drop* yang dikarenakan oleh gravitasi [8].

4. Pemodelan steam generator menggunakan RELAP5-3D

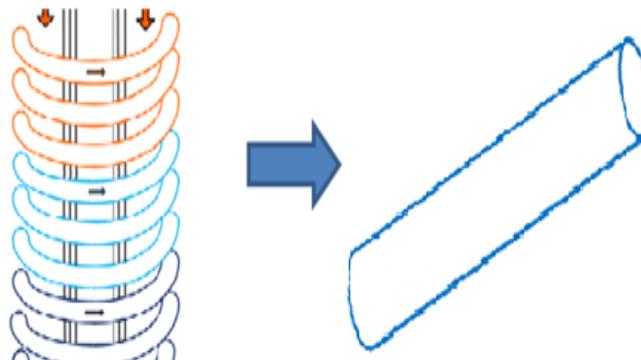
Perancangan model dilakukan dengan menggunakan *system code* RELAP5-3D dan program antar muka SNAP. RELAP5-3D[©] merupakan *system code* yang mampu melakukan analisis terhadap kecelakaan reaktor nuklir [9]. Model dibuat berdasar data karakteristik teknis *steam generator* NGNP. Data-data teknis untuk sistem primer *steam generator* yang digunakan sebagai dasar pemodelan *shell* didapatkan dari referensi [2] kemudian data untuk sistem sekunder yaitu pada geometri *tube* digunakan data teknis pada *steam generator* NGNP pada referensi [4]. Setelah data teknis diketahui, dilakukan perhitungan untuk luas aliran sistem primer, luas aliran sistem sekunder, dan diameter hidrolis. Penyusunan model dilakukan dengan bantuan perangkat lunak SNAP sehingga diperoleh nodalisasi seperti pada Gambar 5. Perancangan model dilakukan dengan membagi *steam generator* menjadi sistem primer dan sistem sekunder. Sistem primer dan sistem sekunder ini terhubung melalui *heat structure* yang berfungsi sebagai alat penukaran panas dari sistem primer ke sistem sekunder.

Pemodelan sistem primer dilakukan dengan membagi sistem primer menjadi 2 buah pipa utama yaitu pipa *downcomer* dan *upcomer* (Gambar 3). *Downcomer* adalah pipa yang digunakan untuk memodelkan aliran helium yang berada pada bagian yang langsung bersinggungan dengan daerah perpindahan panas. Pipa ini dibatasi oleh 2 buah *shell* yaitu *shell* bagian dalam dan *shell* bagian luar. *Upcomer* adalah pipa untuk helium yang digunakan untuk memodelkan aliran helium setelah melewati daerah perpindahan panas, pipa ini dibatasi oleh *shell* bagian luar dan bejana *steam generator*.



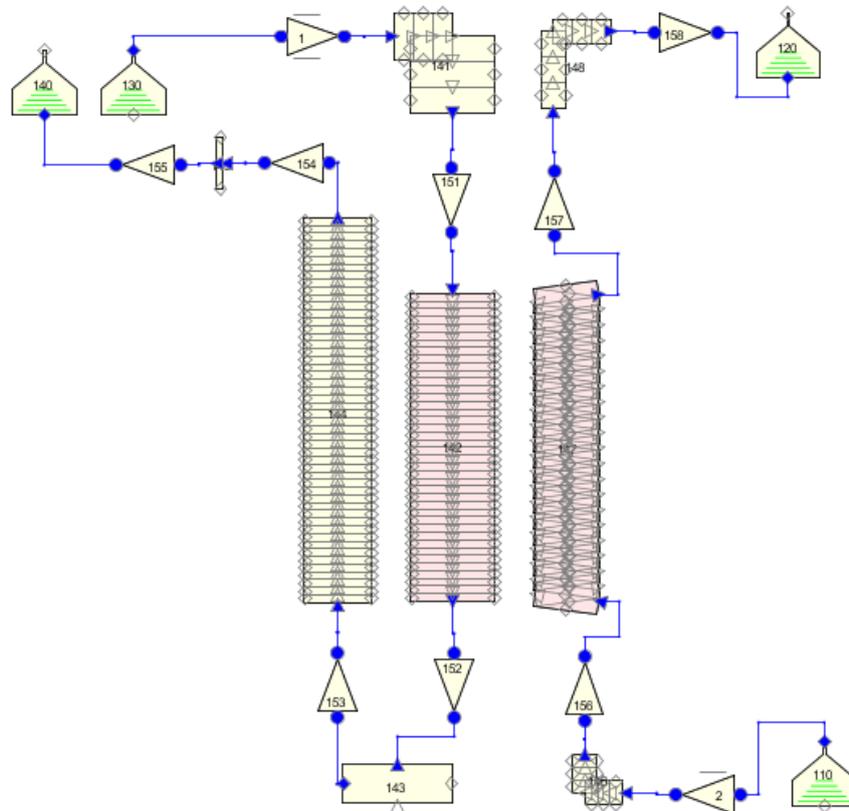
Gambar 3. Analogi pemodelan *downcomer* dan *upcomer*.

Pemodelan sistem sekunder dilakukan secara iteratif untuk menemukan luas aliran yang tepat untuk daya 150 MWt. Langkah iteratif ini dilakukan dengan menambah dan mengurangi banyaknya tube, dengan mengasumsikan *helical-coil bundle* menjadi sebuah pipa dengan luas aliran, luas permukaan perpindahan panas, diameter hidrolis dan diameter hidrolis terpanasi yang ekuivalen. Besar diameter *tube* akan berpengaruh terhadap luas perpindahan panas yang didapatkan. Diameter dan luas dari pipa tunggal yang ekuivalen dapat mempresentasikan perpindahan panas dan laju aliran dari kumpulan pipa yang sebenarnya (Gambar 4).



Gambar 4. Analogi pemodelan *helical tube*

Model sistem primer dan sistem sekunder tersebut kemudian digabungkan menjadi sebuah model *steam generator* dengan menghubungkan sistem primer dan sistem sekunder menggunakan *heat structure*. *Heat structure* akan bekerja sebagai sarana perpindahan panas dari sistem primer ke sistem sekunder. Gambar 5 menunjukkan nodalisasi *steam generator* setelah sistem primer dan sistem sekunder digabungkan.



Gambar 5. Nodalisasi keseluruhan sistem *steam generator* menggunakan RELAP5-3D.

Dari proses nodalisasi, penentuan geometri serta hasil perhitungan kondisi *steady* didapatkan data teknis untuk *steam generator* pada HTR 150 MWt adalah seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Data parameter desain untuk HTR 150 MWt.

Parameter	Nilai	Satuan
Daya termal	147,878	MWt
Tekanan pendingin primer	7	MPa
Suhu pendingin primer		
<i>Inlet</i>	745	⁰ C
<i>Outlet</i>	250	⁰ C
Laju aliran massa helium	57,7	kg/s
Tekanan uap	13,240	MPa
Tekanan air umpan	16,4	MPa
Suhu uap	567	⁰ C
Suhu air umpan	205	⁰ C
Laju aliran massa uap	56,1	kg/s
Diameter <i>steam generator</i>	3	m
Tinggi <i>steam generator</i>	12	m
Panjang <i>helical tube</i>	86,224	m
Diameter dalam <i>tube</i>	24,8	mm
Dimeter luar <i>tube</i>	31,8	mm
Banyaknya <i>tube</i>	1200	unit

Setelah model didapatkan dilakukan variasi terhadap parameter *steam generator* seperti laju aliran massa, tekanan dan untuk kejadian DLOFC. Setelah dilakukan variasi kemudian dilakukan analisis terhadap perilaku parameter-parameter *steam generator* seperti daya, suhu dan fraksi *void* yang dihasilkan. Simulasi dilakukan dalam dua tahap, yaitu tahap untuk mencapai kondisi *steady* dan tahap transien. Tahap *steady* dilakukan dengan menjalankan program selama 5000 detik untuk memastikan semua parameter hidrodinamik dan perpindahan panas telah mencapai kondisi *steady*. Selanjutnya tahap kedua yaitu perhitungan untuk kondisi transien dilakukan juga selama 5000 detik.

Variasi perubahan laju aliran massa dilakukan secara linear. Penurunan laju aliran massa dimulai dari detik ke 5000 dan turun secara linear hingga detik ke 5200 dengan beda laju aliran massa sebesar 20 % dari laju aliran massa awal. Peningkatan laju aliran massa dimulai dari detik ke 5000 dan naik secara linear hingga detik ke 5200 dengan beda laju aliran massa sebesar 20% dari laju aliran massa awal juga.

Variasi tekanan dilakukan dengan cara menurunkan dan meningkatkan tekanan dari sistem pendingin primer secara linear. Penurunan tekanan dimulai dari detik 5000 hingga detik 6000 dengan beda tekanan sebesar 2 MPa. Peningkatan tekanan dimulai dari detik 5000 hingga detik 6000 dengan beda tekanan sebesar 2 MPa juga.

Kondisi DLOFC yang dilakukan dengan penurunan laju aliran massa secara eksponensial hingga mencapai 11,8% dari laju aliran massa awal selama 100 detik dan penurunan tekanan hingga mencapai 11,8% dari tekanan awal selama 100 detik. Penurunan dimulai dari detik 5000 sampai detik 5100.

5. Hasil dan pembahasan

Hasil yang didapatkan dari simulasi menggunakan RELAP5-3D menunjukkan respon terhadap perubahan/kondisi transien yang diberikan.

5.1. Respon Terhadap Perubahan Laju Aliran Massa

Penurunan laju aliran massa menyebabkan turunnya daya. Penurunan daya dikarenakan jumlah pendingin primer yang digunakan untuk penukar kalor semakin berkurang. Penurunan laju aliran massa juga akan menyebabkan suhu pendingin primer akan berkurang secara drastis, hal tersebut dikarenakan banyaknya pendingin primer tidaklah sebanding dengan banyaknya pendingin sekunder yang harus dipanasi, sehingga suhu pendingin primer akan terus berkurang, begitu juga pada pendingin sekunder, pendingin sekunder akan mengalami penurunan suhu dikarenakan kalor yang diberikan oleh pendingin primer tidaklah cukup untuk memanaskan pendingin sekunder. Fraksi *void* pada pendingin sekunder juga berkurang drastis, pembentukan uap bergantung pada panas yang ditransfer dari pendingin primer, transfer panas yang berkurang menyebabkan pembentukan *void* yang semakin berkurang.

Peningkatan laju aliran massa menyebabkan naiknya daya. Peningkatan daya dikarenakan jumlah pendingin primer yang digunakan untuk melakukan penukaran kalor semakin banyak, meningkatnya kapasitas daya yang diberikan oleh pendingin primer dan tingkat penyerapan daya yang konstan dari pendingin sekunder menyebabkan suhu dari pendingin primer lebih lambat menurun. Peningkatan laju aliran massa akan menyebabkan suhu pendingin primer dan pendingin sekunder akan meningkat, hal tersebut dikarenakan banyaknya pendingin primer melebihi jumlah yang dibutuhkan untuk memanasi pendingin sekunder, sehingga suhu pendingin primer akan meningkat. Begitu juga pada pendingin sekunder, meningkatnya daya yang dikarenakan bertambahnya laju aliran massa akan membuat kalor yang di transfer ke pendingin sekunder semakin banyak dan mengakibatkan suhu pada pendingin sekunder menjadi naik. Perubahan fraksi *void* yang dihasilkan terjadi pada bagian tengah daerah perpindahan panas, pada daerah itu didapatkan nilai fraksi *void* pada pendingin sekunder meningkat, seperti yang dijelaskan pada variasi penurunan laju aliran massa bahwa pembentukan uap bergantung pada panas yang ditransfer dari pendingin primer, sehingga dapat diketahui bahwa transfer panas yang meningkat akan meningkatkan laju pembentukan *void* pada *steam generator*.

5.2. Respon Terhadap Perubahan Tekanan

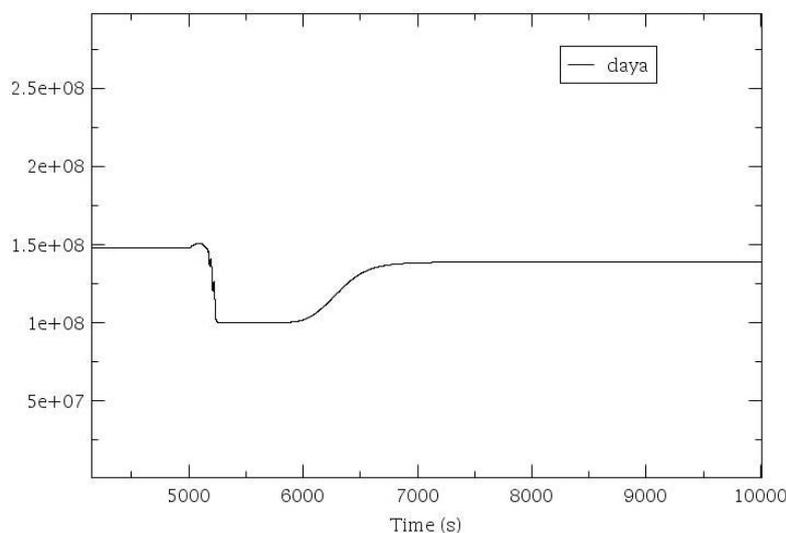
Ketika terjadi transien penurunan tekanan maka respon suhu pendingin primer akan mengalami penurunan, hal tersebut dikarenakan nilai perbedaan entalpi menjadi lebih sempit. Ketika tekanan sistem primer turun laju aliran massa menjadi meningkat. Peningkatan laju aliran massa tersebut dikarenakan densitas pendingin primer yang turun seiring dengan perubahan tekanan pada sistem pendingin primer.

Pada kondisi penurunan tekanan pendingin primer akan menyebabkan suhu dan daya pada pendingin sekunder menjadi menurun, penurunan suhu dan daya tersebut dikarenakan perpindahan panas pada pendingin primer dan sekunder menurun. Turunnya perpindahan panas tersebut dikarenakan turunnya densitas dari pendingin primer sehingga menyebabkan nilai konduktivitas panas menurun. Penurunan transfer panas pada pendingin sekunder akan menyebabkan *void* yang dihasilkan akan semakin sedikit. Ketika terjadi transien peningkatan tekanan, densitas dari sistem pendingin primer akan naik, hal tersebut akan menyebabkan viskositas dari sistem pendingin primer meningkat. Peningkatan viskositas akan menyebabkan kecepatan pada pendingin primer berkurang sehingga konveksi akan menurun dan suhu pendingin primer akan lebih susah mentransfer panasnya. Berkurangnya konveksi dan perpindahan panas dari pendingin primer ke pendingin sekunder akan menyebabkan daya yang dihasilkan menjadi lebih sedikit, dan menyebabkan terjadinya kenaikan suhu pada pendingin primer. Daya pada pendingin primer ke pendingin sekunder lama kelamaan akan bertambah hal tersebut dikarenakan pengaruh laju aliran massa sudah pada kondisi *steady*. Berkurangnya daya dari pendingin primer ke pendingin sekunder menyebabkan suhu pada pendingin sekunder berkurang dan fraksi *void* yang dihasilkan menjadi berkurang juga.

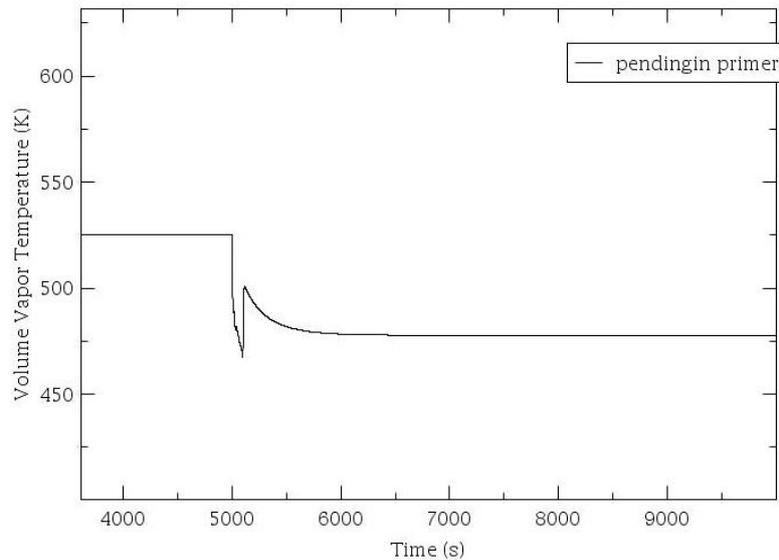
5.3. Respon Terhadap Kejadian DLOFC

Penurunan tekanan akan membuat densitas dari fluida pendingin primer menjadi menurun, turunnya nilai densitas menyebabkan konduktivitas panas dari pendingin primer menurun, sehingga nilai perpindahan konveksi akan menurun. Penurunan laju aliran massa akan menyebabkan banyaknya daya yang diberikan oleh pendingin primer kepada pendingin sekunder menjadi lebih sedikit sehingga daya menjadi terus berkurang, respon perubahan daya dapat dilihat pada Gambar 6.

Suhu pada pendingin primer terus berkurang dikarenakan terjadinya perpindahan panas pada pendingin primer dan pendingin sekunder. Banyaknya pendingin primer yang sedikit mengakibatkan suhu dari pendingin primer berkurang secara drastis.

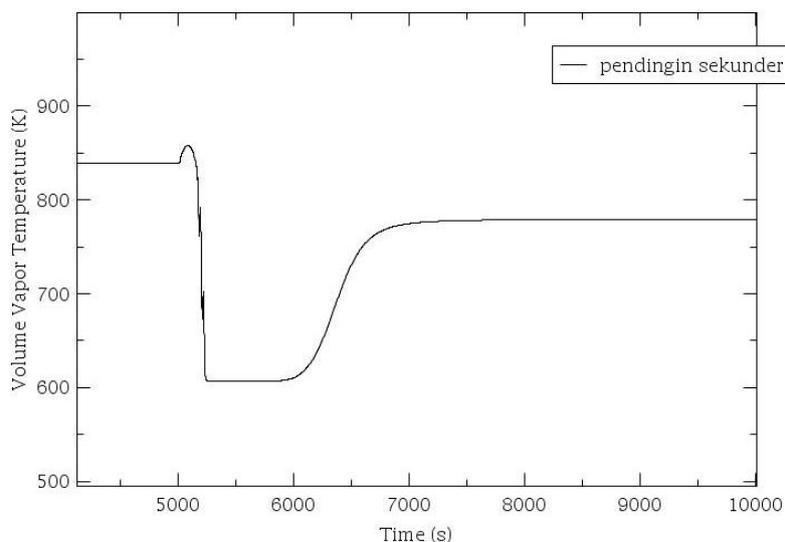


Gambar 6. Grafik perubahan daya pada kondisi DLOFC.

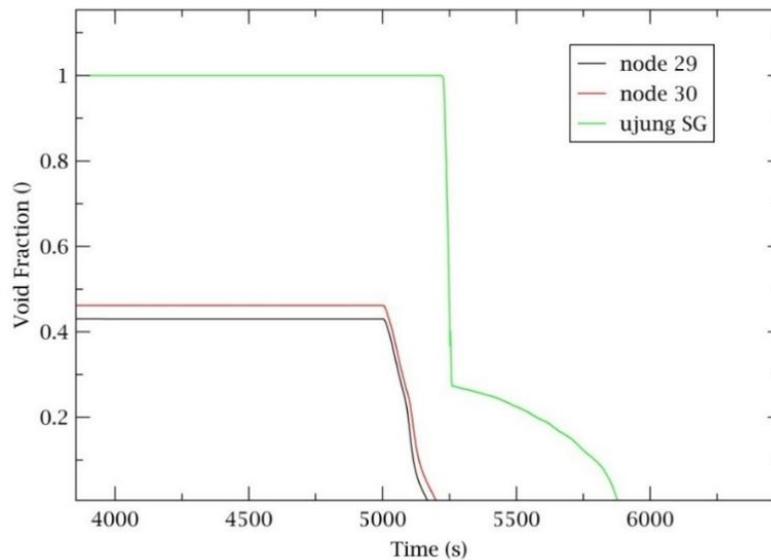


Gambar 7. Grafik perubahan suhu pendingin primer pada kondisi DLOFC.

Pada Gambar 7 dan Gambar 8 dapat diketahui perpindahan panas terjadi pada sistem primer dan sistem sekunder, peningkatan suhu pada pendingin sekunder diakibatkan perpindahan panas yang terjadi antara pendingin primer dan pendingin sekunder tersebut, hal tersebut dibuktikan oleh pendingin primer yang selalu mengalami penurunan suhu dan pendingin sekunder yang mengalami peningkatan suhu. Perpindahan panas tersebut yang menyebabkan peningkatan pada nilai daya yang ada pada Gambar 6. Pada Gambar 9 didapatkan nilai fraksi *void* menurun secara drastis ketika terjadi perubahan tekanan dan laju aliran massa, penurunan tersebut sebanding dengan daya yang dihasilkan oleh sistem pendingin sekunder, namun setelah perubahan laju aliran massa dan tekanan telah selesai terjadi peningkatan produksi *void*. Peningkatan tersebut dikarenakan laju perpindahan panas dari sistem pendingin primer dan sistem pendingin sekunder terjadi secara signifikan pada periode tersebut.



Gambar 8. Grafik perubahan suhu pendingin sekunder pada kondisi DLOFC.



Gambar 9. Grafik perubahan fraksi void pada kondisi DLOFC

6. Kesimpulan

Pemodelan dan simulasi pada *steam generator* HTR 150 MWt telah dilakukan. Simulasi untuk kondisi transien dilakukan dengan melakukan variasi terhadap laju aliran massa dan tekanan serta pada kondisi DLOFC. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penurunan laju aliran massa pada sistem primer akan mengakibatkan daya, suhu pendingin primer, suhu pendingin sekunder, fraksi void menjadi turun. Kenaikan atau penurunan tekanan pada sistem pendingin primer akan menyebabkan daya, suhu pendingin primer, suhu pendingin sekunder, fraksi void akan menurun namun akan kembali seperti semula ketika tidak ada perubahan tekanan. Kondisi DLOFC dengan penurunan laju aliran massa sebesar 88,2% dan tekanan sebesar 88,2% menyebabkan turunnya daya sebesar 9 MWt, suhu pendingin primer sebesar 47,33 K, suhu pendingin sekunder sebesar 60,36 K dan fraksi void sebesar 0,0113.

7. Daftar Pustaka

- [1] Indonesia Business Council for Sustainable Development (IBCS), 2015 *Visi dan Peta Jalan Indonesia 2050* **2** 37-42
- [2] Kuntjoro S., Udiyani P.M, 2016 *Urania* **22** **1** 53-64
- [3] Niu Fenglei, Tian Li, Yu Yu, Li Rizhu, Norman Timothy L, 2014 *Nuclear Engineering and Design* **266** 63-69
- [4] Hoffer N.V., Sabharwall P., Anderson N. A., 2011 *The Journal of Young Investigators* **22** 40-50
- [5] Cong T., Zhang R., Tian W., Su G.H., Qiu S, 2015 *Annals of Nuclear Energy* **85** 127-136
- [6] Zheng Y., Shi L., Dong Y, 2009 *Annals of Nuclear Energy* **36** 742-751
- [7] RELAP5-3D Code Development Team. *RELAP5-3D Code Manual Volume I: Code Structure, System Models and Solution Methods*. Idaho National Laboratory, 2015.
- [8] Sun Peiwei, Wang Zi, Zhang Jianmin, Su Guanghui, 2016. *Annals of Nuclear Energy* **90** 256-263
- [9] Caramello M., Bertani C., Salve M.D., Panella B, 2014 *Journal of Physics: Conference Series* **547** 012034