

## **ANALISIS PENGOPERASIAN SISTEM CORE MAKEUP TANK PADA KONDISI AP1000 BEROPERASI NORMAL**

AndiSofrany Ekariansyah  
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir

### **ABSTRAK**

**ANALISIS PENGOPERASIAN SISTEM CORE MAKEUP TANK PADA KONDISI AP1000 BEROPERASI NORMAL.** Sistem *core makeup tank* (CMT) merupakan bagian dari sistem injeksi keselamatan pada sistem pendinginan teras pasif (PXS) yang merupakan fitur khusus dari reaktor daya AP1000. Sistem CMT bekerja menyediakan penambahan pendingin dan borasi pada kejadian yang tidak melibatkan hilangnya pendingin maupun pada kejadian hilangnya pendingin (LOCA) pada berbagai tingkat keparahan. Klasifikasi kondisi instalasi AP1000 memasukkan kejadian pengoperasian sistem CMT ketika reaktor beroperasi normal sebagai kejadian Kondisi II dan salah satu kejadian yang dianalisis dampaknya menggunakan program LOFTRAN. Pada kondisi itu, diasumsikan katup isolasi tangki CMT membuka secara tidak disengaja dan mengarah pada peningkatan inventori pendingin reaktor. Makalah ini bertujuan menganalisis dampak dari kejadian tersebut menggunakan program RELAP5/SCDAP/Mod3.4 dan membandingkan hasilnya dengan dokumen analisis kecelakaan AP1000. Hasil simulasi menunjukkan karakter arah aliran injeksi tangki CMT ke dalam sistem pendingin primer yang tidak digambarkan secara eksplisit dalam dokumen pembeding. Selain itu diperoleh fenomena perubahan temperatur pendingin pada sistem CMT yang mempengaruhi densitas pendingin dan dampaknya pada sistem pendingin reaktor. Secara umum, fitur keselamatan AP1000 berupa sinyal reaktor trip pada level air *pressurizer* tinggi dan aktuasi sistem pembuangan kalor peluruhan pasif (PRHR) dapat mengantisipasi dampak pengoperasian sistem CMT pada kondisi operasi normal. Dibandingkan dengan sekuensi waktu kejadian dengan LOFTRAN terdapat perbedaan dengan hasil RELAP5, walaupun terdapat banyak kesamaan karakteristik respon sistem pendingin reaktor antara kedua program perhitungan tersebut.

Kata kunci: *core makeup tank*, operasi normal, AP1000

### **ABSTRACT**

**ANALYSES OF CORE MAKEUP TANK OPERATION DURING NORMAL POWER OPERATION OF AP1000 NUCLEAR POWER PLANT.** The *core makeup tank* (CMT) system is a part of safety injection system of passive core cooling system (PXS), which is a unique feature of AP1000 nuclear power plant. The core makeup tanks provide reactor coolant system makeup and boration during events not involving loss of coolant or during various size of loss of coolant accident.. Classification of AP1000 plant condition assigns the operation of the CMT during normal power operation as the Condition II event, which is analyzed using LOFTRAN computer code. On that condition, it is assumed that the isolation valves of one CMT are inadvertently opened, which leads to increase in reactor coolant inventory. The objective of this paper is to analyze the effect of that event using RELAP5/SCDAP/Mod3.4 computer code and to compare the results with accident analyses document. The results show a characteristic of flow direction from the CMT in to the primary system not explicitly described in the document. The phenomena of coolant temperature change on the CMT system has also been obtained in the results, which affects the coolant density and its impact on the reactor coolant system. Generally, AP1000 safety feature in form of reactor trip signal on high *pressurizer* level and passive residual heat removal system (PRHR) actuation are able to anticipate the impact of the CMT operation during normal power operation. Compared with the LOFTRAN results, there is difference in the duration of the event sequences resulted from RELAP5 simulation, even though there are many similarity on the response characteristic of reactor cooling system among the two codes.

Keywords: *core makeup tank*, normal power operation, AP1000

## PENDAHULUAN

Reaktor daya AP1000 yang didesain oleh Westinghouse memiliki ciri khusus pada fitur keselamatan teknis yang berbeda dengan reaktor daya lainnya yaitu pemanfaatan sistem pasif dalam memitigasi kecelakaan dasar desain. Salah satu bagian dari fitur keselamatan teknis adalah sistem pendinginan teras secara pasif (*passive core cooling system / PXS*). Fungsi PXS adalah membuang kalor peluruhan melalui sistem pembuang kalor peluruhan (*passive residual heat removal / PRHR*), injeksi keselamatan melalui sistem injeksi keselamatan pasif (*passive safety injection system / PSIS*), dan menurunkan tekanan (depresurisasi) melalui sistem depresurisasi otomatis (*automatic depressurization system / ADS*) [1]. Untuk memenuhi fungsi injeksi keselamatan, PSIS menggunakan tiga sumber air secara pasif yaitu dari tangki *core makeup tank* (CMT), akumulator, dan tangki *in-containment refueling water storage tank* (IRWST). Tangki CMT menggantikan sistem injeksi keselamatan tekanan tinggi pada PWR konvensional untuk menyediakan injeksi pendingin selama waktu tertentu secara sirkulasi alam atau gravitasi [2]. Tangki CMT akan beroperasi pertama kali pada kondisi kebocoran sistem primer ukuran kecil. Injeksi pendingin untuk jangka panjang disediakan melalui gravitasi dari tangki IRWST yang berada di dalam sungkup di atas untai sistem pendingin reaktor. Tangki IRWST didesain berdasarkan tekanan atmosfer sehingga sistem pendingin reaktor harus didepresurisasi agar injeksi dari tangki IRWST dapat bekerja. Untuk itu, PSIS dilengkapi dengan fitur ADS yang terdiri dari empat tahapan untuk menjalankan proses penurunan tekanan sistem reaktor secara perlahan dan terkendali [3].

Pada intinya, tangki CMT akan bekerja menyediakan penambahan pendingin dan borasi pada kejadian yang tidak melibatkan hilangnya pendingin terutama ketika sistem penambahan pendingin secara normal tidak tersedia atau tidak mencukupi. Pada kejadian hilangnya pendingin (*loss of coolant accident / LOCA*), tangki CMT akan menyediakan penambahan pendingin sesuai tingkat keparahan atau laju hilangnya pendingin. Pada pengoperasiannya, terdapat dua moda operasi untuk tangki CMT yaitu injeksi dengan kompensasi uap dan resirkulasi air. Pada moda pertama, fluida uap akan masuk ke tangki dan menggantikan air yang diinjeksi ke dalam sistem pendingin reaktor. Uap biasanya akan masuk ke dalam tangki bila lengan dingin mengalami pendidihan. Pada moda kedua, fluida air dengan temperatur tinggi dari lengan dingin memasuki tangki sementara air dingin di dalam tangki mengalir masuk ke dalam sistem pendingin reaktor [4].

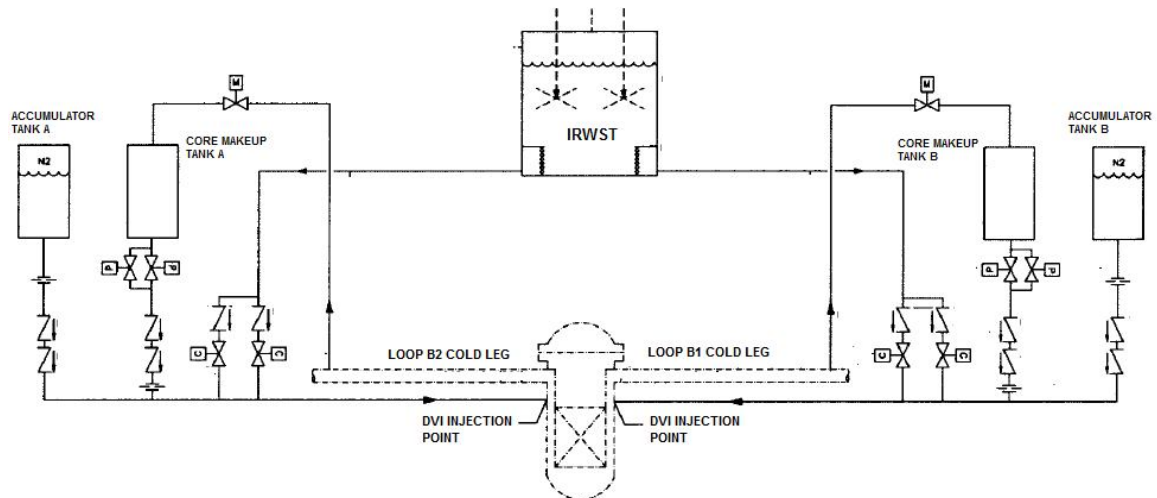
Analisis kecelakaan yang melibatkan reaktor daya AP1000 memasukkan kondisi pengoperasian tangki CMT ketika reaktor beroperasi pada daya penuh sebagai salah satu kejadian kecelakaan dengan klasifikasi Kondisi II yaitu kejadian dengan frekuensi moderat [5]. Secara definisi, kejadian pada Kondisi II menyebabkan trip reaktor namun reaktor mampu kembali ke kondisi operasi normal. Kejadian tersebut tidak akan mengarah ke kondisi yang lebih parah (Kondisi III atau IV). Selain itu, Kondisi II tidak akan menyebabkan kegagalan bahan bakar, kegagalan sistem pendingin reaktor, atau peningkatan tekanan sistem sekunder.

Makalah ini akan mensimulasikan pengoperasian tangki CMT pada kondisi reaktor beroperasi normal. Tujuan simulasi adalah untuk memahami desain sistem injeksi pendingin melalui tangki CMT dan pengaruhnya terhadap sistem pendingin reaktor bila beroperasi diluar desain yang diinginkan. Hasil simulasi akan dianalisis dan dibandingkan dengan hasil analisis kecelakaan yang mengakibatkan penambahan inventori pendingin akibat pengoperasian salah satu tangki CMT dan referensi lainnya. Pada intinya, model CMT telah dibuat pada kegiatan penelitian sebelumnya yang melibatkan kondisi kecelakaan lainnya [6]. Namun demikian tetap diperlukan modifikasi model agar simulasi dapat dijalankan sesuai kondisi yang diinginkan. Sebagai alat simulasi digunakan program perhitungan termohidraulika RELAP5/SCDAP/Mod.3.4.

## DESKRIPSI KINERJA CMT

Sistem injeksi melalui tangki CMT pada reaktor daya AP1000 terdiri dari dua tangki vertikal berbentuk silinder dengan bagian kepala dan bagian bawah berbentuk setengah bola. Material tangki terbuat dari baja karbon dan termasuk komponen Kelas A untuk didesain memenuhi persyaratan ketahanan gempa Kategori I. Masing-masing tangki dihubungkan dengan satu lengan dingin (*cold leg*)

pada untai pendingin yang sama melalui jalur penyeimbang tekanan (*pressure balance line / PBL*) ke bagian atas tangki [7]. Bagian keluaran tangki dihubungkan dengan bejana tekan reaktor melalui jalur injeksi langsung (*direct vessel injection / DVI*) dimana titik injeksi berada pada elevasi dekat bagian bawah lengan panas seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1: Skema sistem CMT pada AP1000 [8]

Selama operasi normal, tangki CMT terisi sepenuhnya dengan air borat dengan kandungan boron 3400 ppm dan memiliki tekanan sistem yang sama dengan tekanan sistem pendingin reaktor melalui jalur PBL. Temperatur air borat di dalam tangki dipertahankan sama dengan temperatur udara sungkup pada kisaran 40 °C. Jalur PBL juga penuh terisi air dimana temperturnya mengalami stratifikasi mulai dari titik penghubung di lengan dingin hingga titik masuk tangki CMT. Stratifikasi temperatur di jalur PBL dan densitas air tangki CMT yang lebih tinggi tersebut akan memungkinkan injeksi secara sirkulasi alam dari lengan dingin ke tangki CMT dan ke jalur DVI menuju bejana reaktor bila katup isolasi di jalur *output* tangki CMT dibuka. Hasil simulasi kondisi tunak menggunakan RELAP5 telah dilakukan untuk menunjukkan stratifikasi temperatur pada sistem CMT seperti terlihat pada bagian pemodelan.

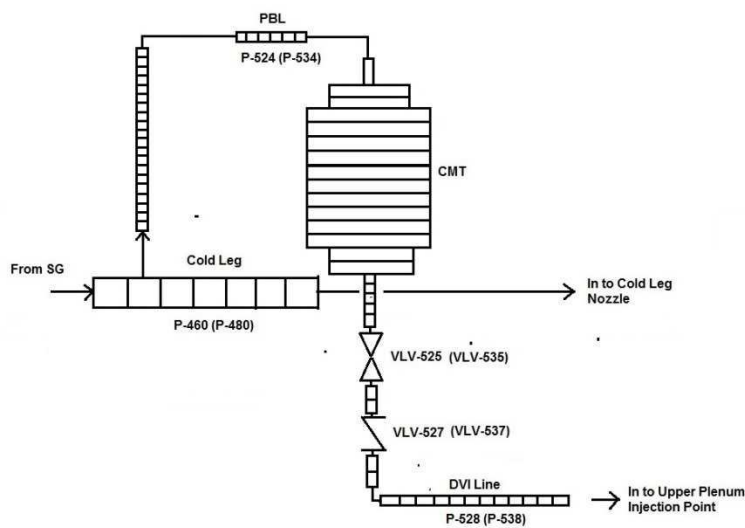
Sirkulasi alam pada injeksi CMT tergantung pada kondisi sistem pendingin reaktor. Bila lengan dingin penuh berisi air, tangki CMT beroperasi pada moda resirkulasi dengan gaya penggerak berdasarkan gravitasi dan perbedaan densitas antara air pendingin di jalur PBL dan air lebih dingin di tangki CMT atau sirkulasi alam fase tunggal [7]. Bila lengan dingin mengalami pendidihan seperti pada kasus LOCA, tangki CMT beroperasi pada moda injeksi uap (*steam-displacement injection*) atau sirkulasi alam dua fase [4, 9]. Pada kondisi tersebut, gaya penggerak adalah berdasarkan gravitasi dan perbedaan densitas antara uap di lengan dingin dan air di tangki CMT.

Moda operasi tangki CMT di atas biasanya terjadi diluar kondisi operasi normal seperti terdapat pada Dokumen Analisis Kecelakaan AP1000 sebagai respon dari kejadian pemicu yang berbeda [5]. Namun dalam kategori kondisi instalasi, pengoperasian tangki CMT ketika reaktor beroperasi pada kondisi normal juga termasuk dalam kejadian yang harus diantisipasi. Pengoperasian tangki CMT akan menaikkan inventori pendingin reaktor dan mempengaruhi kinerja reaktor sehingga perlu dievaluasi dampaknya terhadap keselamatan reaktor. Dokumen Analisis Kecelakaan telah melakukan analisis berdasarkan kejadian tersebut menggunakan program perhitungan LOFTRAN. Fenomena yang ditunjukkan dalam analisis tersebut akan dievaluasi kembali di dalam makalah ini menggunakan program perhitungan RELAP5 berdasarkan kondisi awal dan asumsi yang sama.

## PEMODELAN

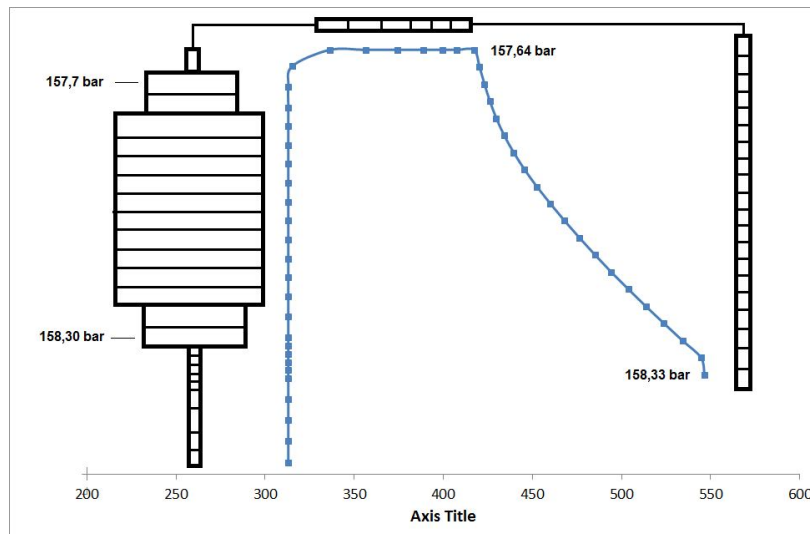
### Model CMT

Pemodelan sistem CMT terdiri dari pipa PBL, tangki CMT, katup isolasi, katup cek, dan jalur pipa DVI. Jalur PBL merupakan pipa ukuran 8 inch (schedule 160) dan dibiarkan terbuka sementara jalur *outlet* tangki dilengkapi dengan dua katup isolasi paralel dan katup cek yang mencegah aliran balik dari arah bejana tekan maupun dari akumulator. Jalur *outlet* tangki terhubung dengan pipa DVI dengan ukuran 8 inch dan berakhir di titik injeksi DVI di bagian *downcomer* bejana. Desain teknis AP1000 hanya memberikan data teknis CMT berupa volume tangki sebesar 71 m<sup>3</sup>, diameter 4,2 m, dan tinggi 6,6 m [10]. Data lainnya adalah beda elevasi antara *outlet* tangki dengan titik injeksi DVI yaitu 2,29 m. Oleh karena itu, pemodelan panjang dan elevasi pipa PBL dan panjang pipa DVI hanya berdasarkan perkiraan. Gambar 2 menunjukkan hasil pemodelan sistem CMT yang dibuat dengan RELAP5. Model RELAP5 yang mewakili sistem CMT terdiri komponen pipa dan katup dengan pembagian segmen yang berbeda.



Gambar 2: Pemodelan CMT menggunakan RELAP5

Katup isolasi (VLV-525 dan VLV-535) dimodelkan dalam kondisi tertutup sementara katup cek (VLV-527 dan VLV-537) pada kondisi terbuka. Fungsi katup cek adalah untuk mencegah aliran balik injeksi pendingin dari akumulator yang terhubung dengan pipa DVI ke arah tangki CMT akibat kejadian LOCA ukuran besar dari penurunan tekanan yang lebih besar di lengan dingin. Model CMT tersebut dihubungkan dengan model reaktor daya AP1000 yang telah digunakan untuk simulasi kejadian lainnya [6]. Sesuai desain, tekanan sistem CMT memiliki tekanan yang sama dengan sistem pendingin primer karena terhubung dengan pipa PBL. Namun, perbedaan elevasi terutama pada titik inlet PBL dan titik injeksi DVI menyebabkan perbedaan tekanan secara hidrostatik. Selain itu terdapat juga stratifikasi temperatur dari bagian inlet PBL hingga bagian pipa DVI karena inlet PBL terhubung dengan temperatur lengan dingin pada kisaran 563 K, sementara temperatur pendingin di dalam tangki CMT berada pada temperatur ruang sungkup sekitar 40 °C (313 K). Stratifikasi temperatur dan perbedaan tekanan tersebut dapat ditampilkan melalui perhitungan kondisi tunak pada daya reaktor 3.465 MWt seperti terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3: Stratifikasi temperatur dan tekanan di dalam sistem CMT

Hasil stratifikasi temperatur dan tekanan pada gambar di atas akan berbeda pada elevasi pipa PBL yang berbeda. Tidak ada laju alir pendingin pada sistem CMT, sehingga stratifikasi temperatur tersebut disebabkan oleh proses konveksi alam pada fluida air. Konsentrasi boron sebesar 3.400 ppm harus dikonversi menjadi fraksi massa boron per massa pendingin pada input RELAP5 menjadi 0,00204 yang nilainya diperoleh dari hasil konversi nilai ppm lainnya [11]. Namun demikian, dampak boron terhadap reaktivitas harus dilengkapi dengan data lainnya untuk dapat dilihat pengaruhnya terhadap daya reaktor. Kondisi tunak pada sistem CMT di atas dijadikan dasar untuk simulasi kondisi kecelakaan selanjutnya.

### Penetapan Kondisi Awal dan Sekuensi Kejadian

Simulasi pengoperasian tangki CMT dilakukan dengan membuka katup isolasi setelah kondisi tunak sistem pendingin reaktor tercapai. Asumsi kondisi awal sistem pendingin reaktor disesuaikan dengan simulasi menggunakan LOFTRAN pada dokumen analisis kecelakaan [5]. Asumsi tersebut antara lain:

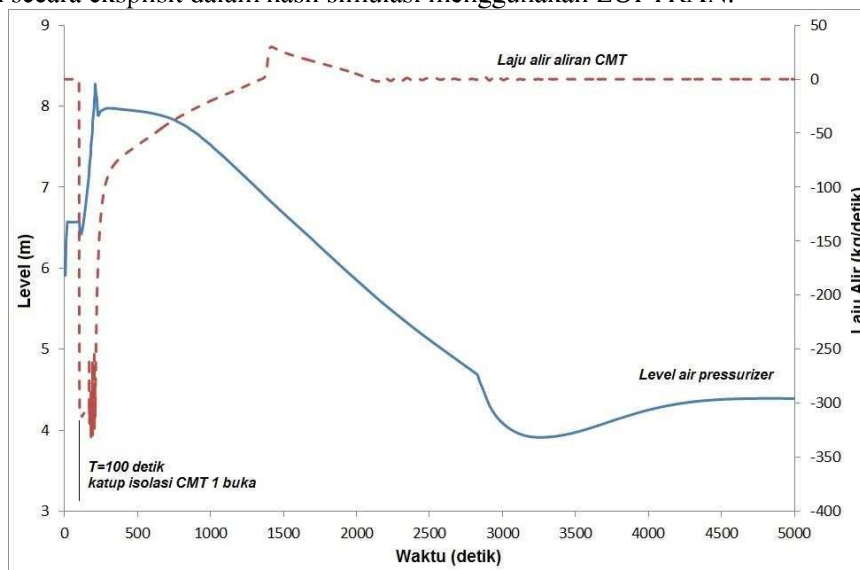
- Daya reaktor ditetapkan sebesar 102 % dari daya termal nominal (3.400 MW) untuk mendapatkan respon termohidraulika yang konservatif.
- Dua katup isolasi dari salah satu CMT diasumsikan membuka pada waktu tertentu setelah simulasi kondisi tunak saat reaktor beroperasi normal.
- Koefisien reaktivitas densitas moderator ditetapkan paling minimum, dalam hal ini adalah nol ( $\$/\text{kg}/\text{m}^3$ ). Koefisien doppler ditetapkan sesuai Kurva Doppler AP1000 dalam dokumen desain [12].
- Reaktor akan trip berdasarkan sinyal sistem proteksi dan pemantauan keselamatan (PMS) yaitu *high-3 pressurizer level* (76 % dari level nominal)
- Aktuasi fitur keselamatan teknis dan komponen lainnya yang diharapkan bekerja melalui PMS antara lain:
  - Katup isolasi PRHR buka (*high-3 pressurizer level*) untuk mengambil kalor peluruhan
  - Katup isolasi tangki CMT kedua buka pada sinyal *Safeguard T<sub>Cold</sub>* ( $< 260\text{ }^\circ\text{C}$ )
  - Katup keselamatan *pressurizer* buka/tutup pada 171,3 / 170,9 bar
  - Katup keselamatan pembangkit uap buka/tutup pada 8,17 / 8,10 bar
- Pompa pendingin primer akan trip berdasarkan asumsi hilangnya daya listrik eksternal (LOOP) pada saat terjadi sinyal trip reaktor untuk dampak kejadian yang lebih konservatif.
- Pengoperasian batang kendali secara otomatis untuk merespon perubahan daya reaktor akibat insersi boron dari CMT seperti dimodelkan dengan LOFTRAN tidak dimodelkan dalam

RELAP5 karena keterbatasan fitur yang disediakan. Untuk itu ditetapkan dua skenario simulasi yang dapat dipertimbangkan:

- Skenario pertama adalah mengasumsikan tidak adanya boron pada air pendingin tangki CMT sehingga tidak ada dampak perubahan reaktivitas pada teras. Dengan demikian dampak yang dipertimbangkan hanya meningkatnya inventori pendingin yang akan memicu sinyal *high-3 pressurizer level*.
- Skenario kedua adalah memasukkan fungsi konsentrasi boron dengan nilai reaktivitas tertentu untuk melihat dampaknya terhadap daya reaktor

## HASIL DAN PEMBAHASAN

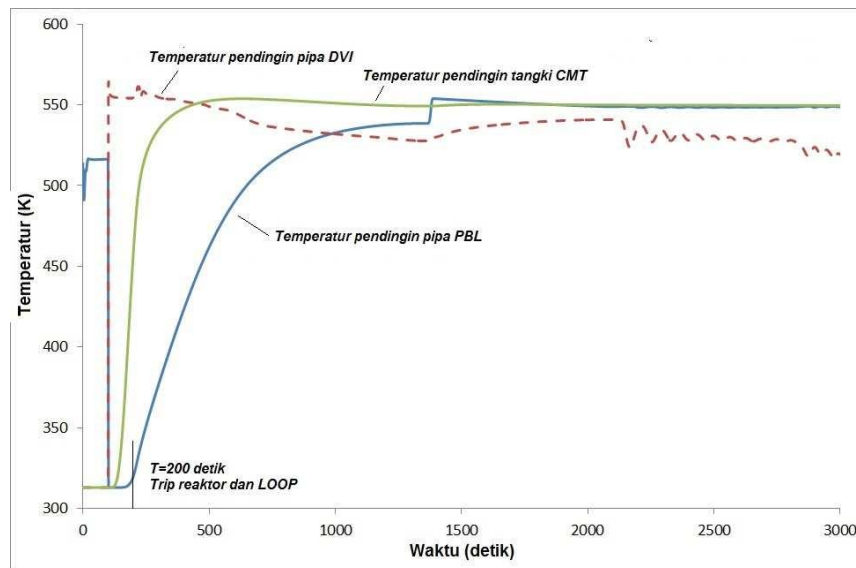
Kejadian membukanya katup tangki CMT dilakukan setelah simulasi kondisi tunak selama 100 detik. Gambar 4 menunjukkan laju alir pendingin dari tangki CMT ketika memasuki sistem pendingin reaktor pada kondisi operasi normal. Hasil simulasi menunjukkan arah aliran pendingin adalah dari tangki CMT naik melalui pipa PBL dan masuk ke dalam lengan dingin atau terjadi aliran balik dibandingkan arah aliran akibat kondisi kecelakaan. Hal tersebut ditunjukkan oleh nilai minus dari laju alir karena berlawanan arah dengan arah aliran ketika pemodelan. Arah aliran tersebut terjadi akibat tekanan pendingin pada lengan dingin lebih rendah daripada tekanan di dalam tangki CMT dan tekanan di dalam *downcomer* bejana tekan, dimana rendahnya tekanan lengan dingin berasal dari aliran pendingin dalam lengan dingin yang berasal dari pompa pendingin primer. Arah aliran ini tidak digambarkan secara eksplisit dalam hasil simulasi menggunakan LOFTRAN.



Gambar 4 : Perubahan laju alir aliran CMT dan level air di dalam pressurizer

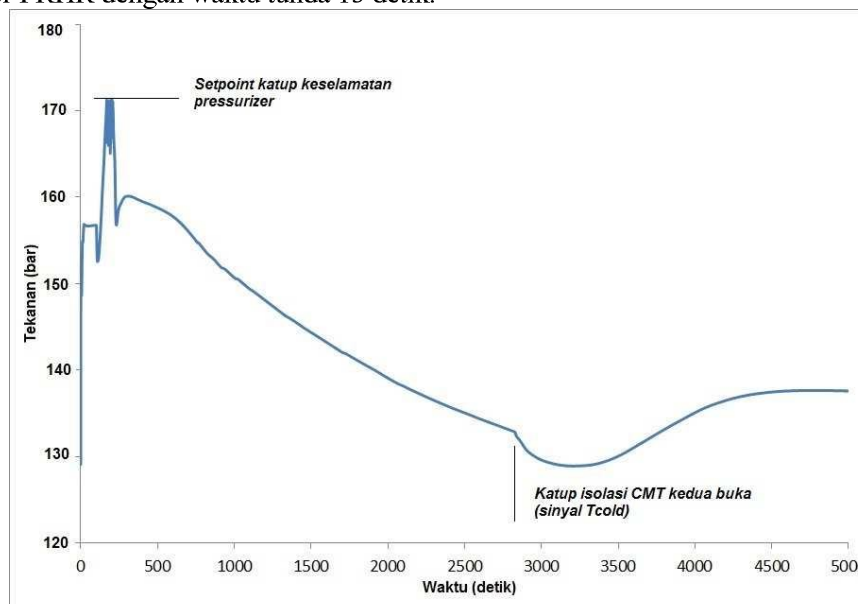
Pada saat yang sama terjadi LOOP yang mengakibatkan berhentinya pompa pendingin primer dengan waktu tunda 4 detik. Berhentinya pompa pendingin primer akan mengakibatkan penurunan aliran pendingin di dalam lengan dingin dan menaikkan tekanan sistem terutama di lengan dingin. Selain itu terjadi kenaikan temperatur lengan dingin akibat berkurangnya kemampuan perpindahan kalor oleh pendingin yang akan menurunkan densitas pendingin di dalam pipa PBL. Penurunan tekanan tersebut akan mempengaruhi beda tekanan antara lengan dingin dengan tangki CMT disertai dengan peningkatan perbedaan densitas pendingin antara pipa PBL dengan air tangki CMT sehingga terjadi penurunan laju alir dari tangki CMT ke arah lengan dingin. Arah aliran akan berbalik arah secara perlahan pada kisaran detik ke-1.300 seperti terlihat pada Gambar 4. Gambar 5 juga menunjukkan perubahan temperatur pendingin pada pipa PBL, tangki CMT dan pipa DVI yang menyebabkan perbedaan densitas pendingin dan pada akhirnya mempengaruhi arah sirkulasi aliran di dalam sistem CMT. Pada tahap awal temperatur PBL akan mengalami penurunan drastis akibat masuknya pendingin dari tangki CMT yang lebih dingin, sementara temperatur di tangki CMT dan

pipa DVI mengalami kenaikan drastis akibat masuknya pendingin dari *downcomer* bejana yang lebih panas.



Gambar 5 : Perubahan temperatur pendingin di pipa PBL dan pipa DVI

Masuknya pendingin dari tangki CMT melalui lengan dingin mengakibatkan meningkatnya level air pendingin di dalam sistem pendingin reaktor yang dapat terlihat dari meningkatnya tekanan primer seperti terlihat dalam Gambar 6 akibat kompresi uap di dalam *pressurizer*. Peningkatan tekanan *pressurizer* tersebut bahkan akan mencapai nilai aktuasi katup keselamatan *pressurizer* yang akan membuka dan menutup pada rentang waktu antara detik ke-180 hingga 203. Naiknya level air di dalam *pressurizer* diakibatkan oleh ekspansi termal pendingin dari peningkatan daya termal reaktor dan pengaruh peningkatan temperatur fluida pada aliran pendingin dari tangki CMT yang masuk ke dalam sistem pendingin reaktor. Level air *pressurizer* akan terus naik hingga mencapai level 76 % dari nilai nominal pada  $T = 205$  detik yang akan memicu sinyal trip reaktor dengan waktu tunda 2 detik. Nilai level *pressurizer* tersebut juga akan membuka katup isolasi PRHR yang akan membuang kalor teras ke penukar kalor PRHR dengan waktu tunda 15 detik.



Gambar 6: Perubahan tekanan primer

Untuk parameter daya reaktor, terjadi sedikit peningkatan daya termal dari daya nominal 3.472 MW hingga 3.533 MW yang berasal dari penurunan temperatur pendingin primer yang mengakibatkan penurunan temperatur bahan bakar dan naiknya reaktivitas positif teras atau efek Doppler. Namun peningkatan daya termal tersebut terhenti ketika terjadi trip reaktor. Membukanya katup penukur kalor PRHR akan membuang kalor peluruhan teras yang masih ada dan menurunkan tekanan sistem primer secara perlahan. Penurunan tekanan primer juga akan menurunkan temperatur lengan dingin hingga pada detik ke-2.800, nilai setpoint  $T_{cold}$  tercapai dan akan membuka katup isolasi tangki CMT kedua. Injeksi pendingin dari tangki CMT kedua juga bekerja dalam moda resirkulasi yaitu dari pipa PBL ke tangki CMT masuk ke bejana reaktor melalui pipa DVI. Gaya penggerak resirkulasi adalah perbedaan temperatur fluida pada pipa PBL yang lebih tinggi dari air di dalam tangki CMT dan pipa DVI. Fluida yang lebih tinggi temperaturnya akan memanaskan temperatur fluida di dalam tangki CMT dan mempengaruhi laju alir aliran sirkulasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem CMT beroperasi pada moda resirkulasi dengan arah yang berbeda pada awal hingga akhir sekuensi bergantung pada kondisi sistem pendingin di dalam sistem primer dan sistem CMT.

Hasil simulasi pada skenario kedua tidak menunjukkan perbedaan yang berarti pada respon sistem pendingin reaktor dibandingkan dengan skenario pertama. Perbedaan utama hanya pada penurunan daya reaktor akibat insersi boron ke dalam teras yang dampaknya hanya terlihat hingga trip reaktor. Penurunan daya termal reaktor tersebut akan mempengaruhi ekspansi termal pendingin *pressurizer* yang menyebabkan waktu tercapainya setpoint *high-3 pressurizer level* oleh peningkatan level air menjadi lebih lambat dibandingkan dengan skenario pertama. Analisis menggunakan LOFTRAN tidak memfokuskan pada dampak insersi boron karena diasumsikan sistem penggerak batang kendali akan naik secara otomatis untuk merespon penurunan daya termal tersebut. Bila daya reaktor kembali stabil dengan cara menaikkan batang kendali secara otomatis, maka skenario pertama dapat mewakili kejadian tersebut selain bahwa penurunan daya reaktor akan membuat skenario kedua menjadi kurang konservatif.

Hasil simulasi menggunakan RELAP5 secara keseluruhan memiliki perbedaan dengan hasil simulasi menggunakan LOFTRAN terutama dari sekuensi waktu beberapa respon parameter termohidraulika dan aktuasi sistem PMS. Tabel 1 di bawah ini menunjukkan perbedaan sekuensi waktu hasil simulasi LOFTRAN dan RELAP5.

Tabel. 1: Sekuensi waktu kejadian antara LOFTRAN dan RELAP5

| Kejadian LOFTRAN   | Waktu (detik) | Kejadian RELAP5  | Waktu (detik) |
|--|---------------|--|---------------|
| Katup CMT pertama buka   | 10            | Katup CMT pertama buka   | 100           |
| High-3 <i>pressurizer</i> level setpoint untuk trip reaktor, LOOP dan trip pompa | 520           | Awal katup keselamatan <i>pressurizer</i> buka/tutup                             | 167 - 209     |
| Katup isolasi PRHR buka  | 573           | High-3 <i>pressurizer</i> level setpoint untuk trip reaktor, LOOP dan trip pompa | 205           |
| Awal katup keselamatan <i>pressurizer</i> buka/tutup                             | 574 - 594     | Katup isolasi PRHR buka  | 220           |
| Setpoint $T_{cold}$ "S" dan katup CMT kedua buka                                 | 12.354        | CMT pertama berhenti resirkulasi   | 2.085         |
| CMT pertama berhenti resirkulasi   | 13.300        | Setpoint $T_{cold}$ "S" dan katup CMT kedua buka                                 | 2.800         |
| Kesetimbangan kalor peluruhan teras dengan penyerapan kalor oleh PRHR            | 21.800        | Kesetimbangan kalor peluruhan teras dengan penyerapan kalor oleh PRHR            | 4.000         |
| CMT kedua berhenti resirkulasi   | 30.900        | CMT kedua berhenti resirkulasi   | 7.500         |

Dari tabel tersebut terlihat ada perbedaan terutama pada sekuensi waktu simulasi secara keseluruhan, dimana simulasi LOFTRAN menghasilkan waktu yang lebih lama dalam pencapaian beberapa respon parameter termohidraulika dan aktuasi sistem PMS dibandingkan dengan RELAP5. Sekuensi waktu yang lebih lama secara umum juga ditemukan pada kejadian kecelakaan lainnya yang



membandingkan model RELAP5 dengan model LOFTRAN [6]. Perbedaan tersebut dapat disebabkan oleh perbedaan pemodelan antara lain pada sistem CMT dimana pada model RELAP5 beberapa dimensi dan geometri pipa PBL dan DVI hanya berdasarkan perkiraan. Selain itu model RELAP5 untuk penukar kalor PRHR kemungkinan mengambil kalor dari sistem pendingin primer pada kuantitas yang lebih tinggi dari desain sehingga lama sekuensi kejadian menjadi lebih cepat. Kemungkinan lainnya adalah belum dimasukkannya nilai-nilai *form losscoefficient* yang sesuai bergantung pada kondisi fluida di dalamnya (bilangan Reynolds) dan menentukan seberapa besar hilangnya energi (*energy loss*) pada model perpipaian maupun kanal pendingin. Belum dimasukkannya data tersebut menyebabkan model RELAP5 terlalu cepat merespon perubahan sistem pendingin secara termal. Namun demikian karakteristik respon sistem pendingin reaktor terhadap kejadian pengoperasian CMT pada saat reaktor daya beroperasi memiliki banyak kesamaan antara kedua program perhitungan tersebut.

## KESIMPULAN

Hasil simulasi menggunakan RELAP5 pada kejadian pengoperasian sistem *core makeup tank* pada kondisi operasi normal pada reaktor daya AP1000 menunjukkan beberapa fenomena termohidraulika yang tidak digambarkan dalam dokumen analisis kecelakaan AP1000. Fenomena tersebut antara lain arah aliran injeksi pendingin tangki CMT pada saat awal kejadian dan pada akhir kejadian dan perubahan temperatur pendingin pada sistem CMT yang mempengaruhi densitas pendingin dan dampaknya pada sistem pendingin reaktor. Secara umum, fitur keselamatan AP1000 berupa sinyal reaktor trip pada level air *pressurizer* tinggi dan aktuasi sistem PRHR dapat mengantisipasi dampak pengoperasian sistem CMT pada kondisi operasi normal. Bila dibandingkan dengan sekuensi waktu kejadian dengan LOFTRAN terdapat perbedaan dengan hasil RELAP5, walaupun terdapat banyak kesamaan karakteristik respon sistem pendingin reaktor antara kedua program perhitungan tersebut.

## DAFTAR PUSTAKA

1. JOSE N. REYES, "AP600 and AP1000 Passive Safety System Design and Testing in APEX", Presented in IAEA-ICTP Natural Circulation Training Course, Trieste, Italy, 25-29 June 2007.
2. T.L. SCHULZ, "Westinghouse AP1000 Advanced Passive Plant", Nuclear Engineering and Design 236, 1547-1557, 2006.
3. JULIE GORGEMANS, et al, "Why the Westinghouse Advanced, Passive Pressurized Water Reactor, AP1000 ?", Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe, Bovec, Slovenia, Sept. 12-15, 2011.
4. D.LIOCE, et al, "AP1000 Passive Core Cooling System Pre-operational Test Procedure Definition and Simulation by Means of RELAP5 Mod. 3.3 Computer Code", Nuclear Engineering and Design 250 (2012) 538-547.
5. WESTINGHOUSE ELECTRIC Co, "AP-1000 European Design Control Document, Chapter 15: Accident Analyses", EPS-GW-GL-700 Revision 0, 2009.
6. ANDI SOFRANY E, SURIP WIDODO, SUSYADI, D.T. SONY TJAHHANI, HENDRO TJAHHONO, "Verifikasi Kecelakaan Hilangnya Aliran Air Umpan pada Reaktor Daya PWR Maju", Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega, Volume 14, Nomor 2, Juni 2012.
7. WESTINGHOUSE ELECTRIC Co, "AP-1000 European Design Control Document, Chapter 6: Engineered Safety Features", EPS-GW-GL-700 Revision 0, 2009.
8. WESTINGHOUSE ELECTRIC Co, "AP-1000 European Design Control Document, Chapter 21: Construction Verification Process", EPS-GW-GL-700 Revision 0, 2009.
9. J. YANG, et al, "Simulation and Analysis on 10-inch Cold Leg Small Break LOCA for AP1000", Annals of Nuclear Energy, Volume 46, Pages 81-89, August 2012.

10. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Final Safety Evaluation Report related to Certification of the AP1000 Standard Design, Chapter 21: Technical Specifications", December 2005.
11. J.G.SUN, et al., "Analysis of Boron Dilution in a Four-Loop PWR", NUREG/CR-6266, March 1995.
12. WESTINGHOUSE ELECTRIC Co, "AP-1000 European Design Control Document, Chapter 4: Reactor", EPS-GW-GL-700 Revision 0, 2009.

### **DISKUSI/ TANYA JAWAB :**

PERTANYAAN : (Rokhmadi – PTRKN BATAN )

- Apakah pada kasus perhitungan/simulasi yang anda lakukan bias diterapkan pada kondisi reactor transien? Jelaskan!

JAWABAN : ( Andi Sofrany – PTRKN BATAN )

- Sistem CMT didesain untuk bekerja sebagai penyedia tambahan air pendingin pada kondisi transien contohnya small-break LOCA, large-break LOCA (setelah injeksi dari accumulator) ataupun station black out.

PERTANYAAN : (Jati Susilo – PTRKN BATAN )

- Apa perbedaan antara RELAP 5 dan LOFTRAN?
- Apa penyebab perbedaan hasil perhitungan yang dihasilkan antara RELAP 5 dengan LOFTRAN?

JAWABAN : ( Andi Sofrany – PTRKN BATAN )

- RELAP 5 dan LOFTRAN adalah code termohidrolik namun berupa code konservatif. Tidak ada informasi yang jelas mengenai korelasi yang digunakan dalam LOFTRAN.
- Perbedaan hasil perhitungan terutama disebabkan oleh kurangnya data desain yang lebih akurat dalam pemodelan CMT, namun demikian respon sistem CMT secara keseluruhan cenderung sama.